

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

В. Д. Левенберг

В. Д. ЛЕВЕНБЕРГ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ БЕЗ ТОПЛИВА



ЛЕНИНГРАД
„СУДОСТРОЕНИЕ“
1987

В книжном магазине № 2 „Судостроитель“, 190031, Ленинград, Садовая ул., 40 можно приобрести следующие книги, выпущенные издательством „Судостроение“:

Пимоненко А. П. Защита судовых дизелей от кавитационных разрушений, 1983, 10 л., ц. 60 к.

Рассмотрены условия и проанализированы причины, приводящие к кавитационным повреждениям охлаждаемых поверхностей втулок и блоков цилиндров средне- и малооборотных судовых дизелей. Показано влияние вибрации, конструктивных, эксплуатационных факторов и физико-химических свойств охлаждающей жидкости на интенсивность кавитационных разрушений в узких полостях охлаждения.

Для специалистов, занимающихся проектированием, постройкой и ремонтом судовых дизелей

Самсонов Ю. А., Феденко В. И. Справочник по ускоренным ресурсным испытаниям судового оборудования, 1981, 17 л., ц. 1 р. 10 к.

В справочнике собран материал о наиболее эффективном средстве проверки долговечности оборудования – ускоренных испытаниях. Даны рекомендации по выбору параметров испытаний паропроизводящих установок, паровых и газовых турбин, двигателей внутреннего сгорания. Особый практический интерес представляют данные оценки ресурса конструкций по прочностным характеристикам.

Предназначен для инженерно-технических работников проектных и научно-исследовательских организаций судостроения и флота, служб надежности и технического надзора и контроля. Может быть использован в учебном процессе на машиностроительных факультетах вузов.

Артемов Г. А. Совершенствование судовых газотурбинных установок, 1984, 17 л., 1 р. 20 к.

Обобщены и систематизированы сведения о газотурбинных двигателях и установках современных газотурбинных судов, указаны основные направления их совершенствования. Особое внимание уделено режимам работы и характеристикам газотурбинных двигателей в составе судового propulsionного комплекса, эксплуатации газотурбинных установок в различных морских условиях и повышению их надежности.

Для инженерно-технических работников, повышающих свою квалификацию, специалистов, занимающихся проектированием, эксплуатацией и ремонтом ГТУ.

Заказы можно посылать в отдел магазина Книга — почтой

Алмазов Г. К., Степанов В. В., Гуськов М. Г. Элементы судовых систем Справочник, 1982, 24 л., ц. 1 р. 60 к.

Систематизированы сведения по трубопроводам, судовой арматуре, приводам управления арматурой, гидравлическим механизмам судовых систем, аппаратам. Подробно рассмотрены применяемые в системах типы труб, их характеристики, виды соединений, конструкции переборочных и палубных стаканов, колец, тройников.

Рассчитан на проектировщиков судовых систем и арматуры. Может быть полезен мастерам и механикам, занимающимся ремонтом и эксплуатацией судов, а также студентам судостроительных вузов и курсантам мореходных училищ.

Рецензенты к т **А. Н. Дмитриев,** к т н Е. В. Мякин

Левенберг В. Д.
Л35 Энергетические установки без топлива Л Судостроение,
1987. - 104 с., ил
ИСБН

Рассмотрены экологически чистые энергетические установки на базе турбоагрегатов, двигателей Стирлинга, термоэлектрических и термомеханических генераторов с тепловыми аккумуляторами в качестве источников тепловой энергии. Приводятся данные для определения эффективности и выбора параметров энергетических модулей. Дана сравнительная оценка эффективности энергетических установок различного типа с тепловыми аккумуляторами, а также с другими типами установок, использующих химические топлива и электроаккумуляторные батареи.

Для специалистов, занимающихся проектированием и созданием энергетических установок с тепловыми аккумуляторами

Л 36050 30000-040
048 (01) - 87 13-87

ББК 39 455

ОГЛАВЛЕНИЕ	
ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ТЕПЛОВЫМИ АККУМУЛЯТОРАМИ В СУДОВОЙ ТЕХНИКЕ	6
1.1. Типы энергетических установок с тепловыми аккумуляторами	6
1.2. Энергетические установки с тепловыми аккумуляторами технических средств освоения океана	8
1.3. Энергетические установки с тепловыми аккумуляторами в системах жизнеобеспечения	16
1.4. Энергетические установки с тепловыми аккумуляторами для нагрева элементов конструкций	20
2. ТЕПЛОВОЙ ГРАФИТОВЫЙ АККУМУЛЯТОР - ВЫСОКОПOTЕНЦИАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ	22
2.1. Сравнительные характеристики тепловых аккумуляторов	22
2.2. Показатели эффективности теплового графитового аккумулятора	26
2.3. Выбор типа теплоизоляции	31
2.4. Выбор режима нагрева аккумулятора	35
2.5. Оценка времени остывания теплового аккумулятора при отсутствии нагрузки	42
3. МАШИННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ В УСТАНОВКАХ С ТЕПЛОВЫМИ ГРАФИТОВЫМИ АККУМУЛЯТОРАМИ	45
3.1. Газотурбинные преобразователи	45
3.2. Двигатели Стирлинга	48
3.3. Высокочастотные электрогенераторы	51
3.4. Способы передачи теплоты от аккумулятора преобразователю энергии	55
3.5. Принципы компоновки теплового графитового аккумулятора и преобразователя в энергетическом модуле	57
4. ПАРАМЕТРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ НА БАЗЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРА	58
4.1. Эффективность газотурбогенератора с тепловым графитовым аккумулятором и энергетических модулей	58
4.2. Целевая функция и оптимальные параметры	63
4.3. Возможности утилизации теплоты аккумулятора	70
4.4. Рекомендации для проектирования	72
5. ПАРАМЕТРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ НА БАЗЕ СТИРЛИНГГЕНЕРАТОРА И ГЕНЕРАТОРОВ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ	74
5.1. Эффективность двигателей Стирлинга с тепловым графитовым аккумулятором и энергетического модуля	74
5.2. Особенности энергетических модулей с прямым преобразованием энергии тепловых графитовых аккумуляторов	81
5.3. Эффективность термоэлектрических и термомеханических генераторов	82
5.4. Эффективность энергетических модулей	87
6. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК РАЗЛИЧНОГО ТИПА	89
6.1. Исходные положения	89
6.2. Эффективность источников энергии	90
6.3. Сравнение эффективности турбинных установок различного типа	92
6.4. Сравнение эффективности энергетических установок различного типа с тепловыми аккумуляторами	95
6.5. Сравнение эффективности энергетических установок с тепловыми аккумуляторами и электроаккумуляторами	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	99
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	101

Решение ряда важных народнохозяйственных задач — изучение и освоение океана, использование возобновляемых источников энергии, экономия топлива, создание экологически чистых средств освоения океана — поставленных в Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 гг. и на период до 2000 г. связано с разработкой и созданием энергетических установок с нетрадиционными источниками энергии.

Одним из направлений в решении перечисленных задач является разработка энергетических установок, которые непосредственно не используют химическое топливо. Речь в этом случае идет о применении так называемых вторичных источников энергии, среди которых важное место занимают аккумуляторы тепловой энергии.

Энергетические установки с тепловыми аккумуляторами в настоящее время используются в различных областях техники и имеют перспективы более широкого применения. Их мощность в зависимости от назначения колеблется от нескольких киловатт до нескольких десятков мегаватт. Такие установки могут найти применение там, где невозможно или нецелесообразно использовать химическое топливо. Отсутствие процессов горения и выбросов делает энергетические установки с тепловыми аккумуляторами экологически чистыми. Возможность работы энергетических установок без доступа воздуха позволяет использовать их для различных технических средств освоения океана. Такие установки хорошо komponуются в виде энергетических модулей, что позволяет разрабатывать унифицированный мощностной ряд для различных потребителей. Применение энергетических установок с тепловыми аккумуляторами позволяет существенно уменьшить их массу по сравнению с традиционными используемыми электроаккумуляторными батареями.

В гл. 1 описаны энергетические установки с тепловыми аккумуляторами, применяемые в технических средствах освоения океана. В гл. 2 и 3 рассмотрены вопросы эффективности тепловых аккумуляторов различного типа, предназначенных для автономных источников энергии, а также наиболее экономичных преобразователей тепловой энергии (газотурбинный преобразователь и двигатель Стирлинга). Приводятся

информация по высококачественным электрогенераторам. В гл. 4 и 5 даны рекомендации по выбору основных параметров энергетических модулей на базе газотурбогенератора и стирлинг-генератора с тепловыми графитовыми аккумуляторами, зависимости для определения их массогабаритных показателей, а также оценка эффективности энергетических модулей с прямым преобразованием энергии тепловых графитовых аккумуляторов в электрическую. В гл. 6 выполнена сравнительная оценка эффективности различных типов энергетических установок, которая позволяет использовать приведенную информацию при выборе типа установки.

В книге использован многолетний опыт работы автора в области автономных источников энергии технических средств освоения океана. Гл. 1 и 2 написаны совместно с М. Р. Ткачем, 2-4 — совместно с В. И. Тимофеевым.

Отзывы и пожелания просим присылать по адресу 191065 Ленинград, ул. Гоголя, 8, издательство „Судостроение“.

1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ТЕПЛОВЫМИ АККУМУЛЯТОРАМИ В СУДОВОЙ ТЕХНИКЕ

1.1. Типы энергетических установок с тепловыми аккумуляторами

Применение теплового аккумулятора (ТА) в качестве источника тепловой энергии позволяет создать широкий класс энергетических установок (ЭУ) различного типа и целевого назначения. В зависимости от назначения ЭУ с ТА могут быть предназначены для выработки механической, электрической и тепловой энергии, которая далее может быть преобразована в другой вид энергии в соответствии с назначением объекта, на котором применяется эта установка. ЭУ с ТА могут выполняться автономными или представлять собой часть ЭУ более сложного типа, допускающей использование основного источника энергии другого типа.

Так как ТА представляет собой устройство, позволяющее накапливать, консервировать и отдавать тепловую энергию, то очевидно, что типы ТА также могут быть различными. Наиболее характерными являются ТА, использующие в качестве теплоаккумулирующего материала (ТАМ) различные соли и оксиды металлов, которые доводят до плавления с целью использования теплоты плавления. ТАМ может быть и твердым (например, оксиды металлов при температурах ниже температур плавления или графит). ТА может быть создан с использованием в качестве ТАМ перегретой воды под большим давлением.

В качестве преобразователей тепловой энергии аккумулятора в механическую могут быть предложены двигатели: газотурбинные, паротурбинные, с внешним подводом теплоты (например, двигатель Стирлинга — ДС), гидрореактивные, а также паровые машины. Интерес представляют термоэлектрические и термоэмиссионные генераторы, которые используют в установках непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую.

Перенос теплоты от аккумулятора к преобразователю энергии может осуществляться с помощью газового теплоносителя (газотурбинная установка или установка с ДС при наличии внешнего замкнутого контура), тепловых труб (в установках с термоэлектрическими и термоэмиссионными преобразователями, а также с ДС), собственно теплоаккумулирующего вещества (например, при использовании перегретой воды). Подготовка установки к действию связана с передачей требуемого

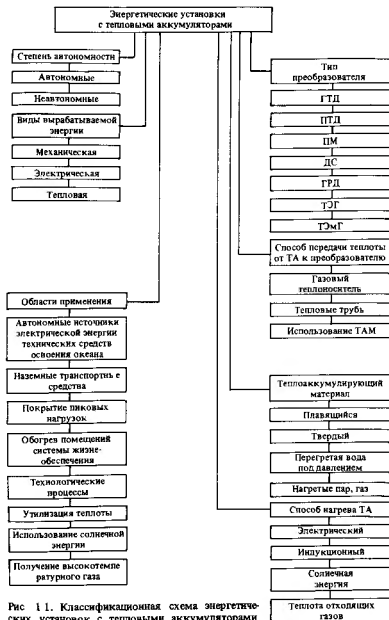


Рис 1.1. Классификационная схема энергетических установок с тепловыми аккумуляторами

го количества энергии от постороннего источника тепловому аккумулятору. Нагрев ТА может осуществляться непосредственным пропусканием тока через соответствующий проводник, индукционным способом за счет утилизируемой теплоты с использованием солнечной энергии и другими способами.

Легко заметить, что в зависимости от назначения установки типов ТА и преобразователя тепловой энергии, способов нагрева аккумулятора и передачи теплоты потребителю конструктивные формы ЭУ будут различными. Оставляя пока в стороне вопросы конструктивного исполнения таких установок, укажем на основные области их применения. В частности, ЭУ с ТА могут применяться в качестве автономных источников электрической энергии различных технических средств освоения океана, для обеспечения движения наземных транспортных средств в составе установок электростанций для покрытия пиковых нагрузок для обогрева помещений, в установках утилизации теплоты, для получения высокотемпературного рабочего вещества с целью его использования в экспериментальных установках и ряде других областей. Классификационная схема ЭУ с ТА приведена на рис. 1.1.

Следует подчеркнуть одну характерную особенность установок с ТА. Эти установки являются экологически чистыми и не оказывают вредного влияния на окружающую среду. Отсутствие процессов сжигания топлива или других химических реакций, отсутствие различных выбросов делают целесообразным использование таких установок в специфических условиях эксплуатации.

1.2. Энергетические установки с тепловыми аккумуляторами технических средств освоения океана

Так как установки с ТА не требуют атмосферного воздуха как это имеет место в установках открытого цикла с сжиганием топлива, то естественным является их использование в качестве автономных источников энергии различных технических средств освоения океана. Рассмотрим характерные типы установок с ТА для указанной области применения.

Газотурбинные установки (ГТУ). Одним из интересных технических решений является ГТУ с ТА, используемым в качестве ТАМ графит [20, 30] (рис. 1.2). Мощность созданной экспериментальной установки составляет 30 кВт. Так как установка с замкнутым циклом, то газовый теплоноситель (в данном случае аргон) является и рабочим веществом газотурбинного двигателя (ГТД).

Центробежный компрессор и центробежная силовая турбина образуют единый турбокомпрессорный блок, который вращается с частотой 52 тыс. об/мин. Ротор имеет подшипники с газовой смазкой

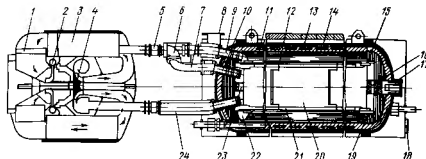


Рис. 1.2. Газотурбинная установка мощностью 30 кВт с тепловым графитовым аккумулятором

1 - охлаждающий газ; 2 - компрессор; 3 - регенератор; 4 - турбина; 5 - сильфон; 6 - разделительный клапан; 7 - трубопровод подвода газа в камеру смешения; 8 - выход охлаждающего воздуха; 9 - графитовый трубопровод подвода газа к катулке вокруг матрицы; 10 - графитовый трубопровод подвода газа в камеру смешения; 11 - индуктор; 12 - теплоизоляция; 13 - магнитопровод; 14 - прочный корпус; 15 - опорное кольцо; 16 - упорный элемент; 17 - пружина; 18 - вход охлаждающего воздуха; 19 - композиционная опора; 20 - матрица; 21 - катулка; 22 - камера подвода газа; 23 - упорный элемент; 24 - трубопровод подвода газа к турбине

Регенератор противоточный кольцевой с высокоэффективной пластинчатой-ребристой поверхностью расположен вокруг турбокомпрессора. Охладители газа пластинчатого типа находятся между выходом из регенератора и входом в компрессор и выполнены одлоходовыми по газу и 4-ходовыми по воде.

Температура аргона перед турбиной составляет 1089 К, перед компрессором 303 К, степень регенерации 0,855, КПД турбины 0,84, КПД компрессора 0,76. При этих параметрах и характеристиках элементов КПД цикла ГТУ достигает величины 0,301. Следует заметить, что значения КПД турбомашин и степени регенерации заметно меньше чем достигнутые в аналогичных двигателях в смежных областях техники [12, 22, 28, 32].

Тепловой графитовый аккумулятор с энергоемкостью 100 кВт·ч тепловой энергии позволяет работать ГТУ в течение одного часа. Графитовая матрица состоит из трех частей. Наружный диаметр матрицы 0,267 м, масса 134 кг. На цилиндрической поверхности матрицы расположены каналы для прохода газа через теплоизоляцию. Внутри матрицы имеются каналы для поступления газа в камеру смешения. Матрица опи-

рается на композитную опору в осевом направлении она зафиксирована упорными элементами.

Теплоизоляция — многослойная что позволяет существенно уменьшить потери в окружающей среде. Она состоит из графитового войлока толщиной 76,2 мм, алюминий-силикатного войлока 6,4 мм, теплоизоляционного картона — 5 мм.

Нагрев матрицы — индукционный. Индуктор имеет 9 витков медных трубок диаметром 12,7 мм, соединенных параллельно. Для охлаждения индуктора предусмотрена замкнутая гелиевая система, включающая водяной охладитель гелия и объемный компрессор с герметичным электродвигателем мощностью 7 кВт. Давление гелия в системе 0,7–3,5 МПа. С целью снижения нагрева корпуса токами рассеяния применяется магнитопровод который расположен вокруг индуктора. Магнитопровод выполнен из листов электротехнической стали, которые изолированы друг от друга высокотемпературной краской; магнитопровод изолирован от корпуса силиконовым каучуком.

ТА имеет прочный корпус (ПК) рассчитанный на давление около 2 МПа. ПК окружен дополнительным кожухом, через который прокачивается воздух, что позволяет охлаждать ТА. Подвод газа к ТА осуществляется по четырем трубопроводам, идущим от регенератора. Трубопровод подвода газа диаметром 50,8 мм выполнен из хромоникелевой стали и состоит из сильфона, разделительного клапана и двух труб, подводящих газ в камеру смешения и к каналу на периферии матрицы. Ввод газа внутрь ТА осуществляется по графитовым трубам, проходящим через теплоизоляцию. Труба, входящая в камеру смешения, закрыта графитовым диском, защищающим металлические части трубопровода от нагрева излучением матрицы.

Отвод газа от ТА и подвод его к турбине осуществляются по четырем изолированным трубопроводам. Подвод газа из камеры смешения к трубопроводу происходит по графитовой трубе, проходящей через теплоизоляцию и закрытой графитовым диском. Для нагрева ТА создана электрическая система, состоящая из электромагнитного преобразователя частоты мощностью 200 кВт вырабатывающего ток частотой 3000 Гц при напряжении до 800 В компенсирующих конденсаторов, станции управления.

Поддержание постоянной температуры газа перед турбиной обеспечивается системой контроля и управления путем изменения соотношения расходов в камеру смешения и в матрицу при отклонении температуры перед турбиной от заданной величины. Система поддержания постоянной температуры включает в себя термодары, размещенные в отводящих трубопроводах блок контроля температуры, электроэлектронический преобразователь и разделительный клапан, управляемый воздухом из баллонов. С торцов матрицы имеются по две термодары, помещенные в защитный кожух что позволяет контролировать величины температур

Тепловая схема установок с параметрами в характерных точках изображена на рис. 1.3. Изменение температур матрицы в процессе испытаний показано на рис. 1.4. ЗУ с ТА в общей сложности работала 7 ч в течение 13 циклов испытаний. В течение одного из них установка работала 1,37 ч а максимально достигнутая температура матрицы составила 2300 К.

В целом экспериментальные исследования подтвердили работоспособность и до статочно высокую эффективность ЗУ с тепловым графитовым аккумулятором.

В табл. 1.1. приведены основные характеристики ГТУ с тепловым графитовым аккумулятором мощностью 1290 и 750 кВт. Проработки

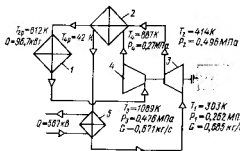


Рис. 1.3. Основные параметры газотурбинной установки мощностью 30 кВт с тепловым графитовым аккумулятором

1 — тепловой аккумулятор; 2 — регенератор, 3 — компрессор; 4 — турбина; 5 — охладитель газа

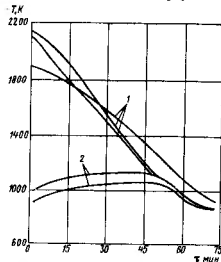


Рис. 1.4. Изменение температуры в характерных точках газотурбинного двигателя с тепловым графитовым аккумулятором в процессе работы

1 — температуры матрицы теплового аккумулятора; 2 — температуры на входе в турбину — максимальная и минимальная

Таблица 1.1. Эффективность газотурбинных установок с тепловыми графитовыми аккумуляторами

Параметр	Мощность, кВт					
	1290			750		
Толщина слоя изоляции, мм:						
графитовый войлок	285	247		135		
алюминий-силикатный войлок	25	33		20		
пирографит экранно-вакуумная		25		25		
Мин-К циркониевый войлок			136		12	
			15	19	102	
Размеры (D x L), мм						
ТА	3,7x17,4	3,7x25,9	3,7x15,9	2x3,3	1,9x3,3	
матрицы	3x13,7	3,3x12,2	3x12,2	1,5x1,8		
Масса, т:						
матрицы	170	177	187	8,39	7,73	
изоляции	6,2	5,9	32	0,31	1,85	
индуктора	1		0,9	0,24	0,22	
магнитопровода	5,5		4,9	0,76	0,7	
ГТД		1,59		0,91		
редуктора		0,18		0,11		
генератора с выпрямителем		0,39		0,27		
системы управления ГТД		0,34		0,23		
системы управления ТА		0,27		0,18		
системы поддержания мощности		0,91		0,68		
прочного корпуса	50		46	1,48	1,29	
ЭУ с ТА	236	243	274	13,56	14,17	
Максимальные потери теплоты, кВт	1487	1168	406	149	51	
Полная нагрузка:						
автомониторинг ч	43	46	51	43	3,81	
энергоёмкость	51,12	54,68	60,63	51,13	2,52	
МВт-ч						
средние тепловые потери, кВт	484	384	182	97	54,8	
удельная энергоёмкость, Вт-ч/кг	216	225	221	228	198	
Частичная нагрузка:						
автомониторинг ч	217	217	333	314	27,65	
энергоёмкость	32,0	36,42	40,1	46,3	2,44	
МВт-ч						
средние тепловые потери, кВт	135	150	179	207	180	
удельная энергоёмкость, Вт-ч/кг	372	312	168	90	51,0	

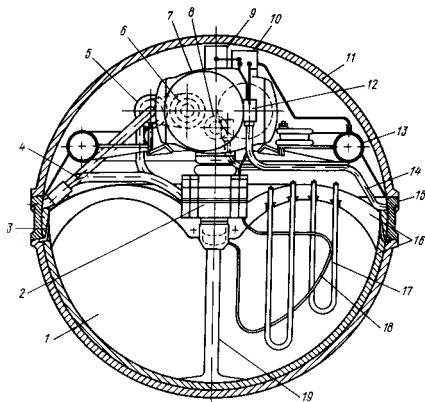


Рис. 1.5. Энергетическая установка мощностью 22 кВт с двигателем Стирлинга

1 – фтористый литий; 2 – двигатель Стирлинга; 3 – опора; 4 – водяной трубопровод; 5 – водяной насос; 6 – коленчатый вал (левый); 7 – генератор; 8 – стартёр; 9 – гелиевый компрессор; 10 – регулятор; 11 – прочный корпус; 12 – коленчатый вал (правый); 13 – гелиевый баллон; 14 – кабель; 15 – скрепляющее кольцо; 16 – вакуумная теплоизоляция; 17 – нагревательный элемент; 18 – трубки нагревателя двигателя Стирлинга; 19 – опора

Установки с двигателями Стирлинга Как двигатель внешнего подвода теплоты ДС удачно объединяется с ТА, позволяя создавать автономные источники энергии для различных технических средств освоения океана. Известные в настоящее время технические решения охватывают в основном установки с ТА, использующими в качестве ТА расплавы солей. Компоновка энергетической установки определяется формой ПК аппарата, в котором размещается оборудование. На рис. 1.5 представлена компоновка ЭУ с ДС мощностью 22 кВт предназначенная для выработки электрической энергии [35]

Как видно, принципы компоновки обусловлены сферическим ПК, диаметр которого составляет 2,13 м. В нижней части сферы расположен плавящийся ТАМ

В данной установке используется фтористый литий; его масса равна 453,6 кг. Для уменьшения потерь теплоты в окружающую среду применена экранно-вакуумная изоляция толщиной 25,4 мм, что позволяет довести величину этих потерь до 0,1 % аккумулялированной энергии в час. Нагрев и расплавление ТАМ осуществляется нагревательными элементами сопротивления помещенными непосредственно в ТАМ. В конструкции емкости для фтористого лития предусмотрена возможность компенсации больших объемных расширений, возникающих при плавлении. Передача теплоты от фтористого лития к двигателю осуществляется в процессе перекачки его рабочего вещества по трубкам, размещенным в ТАМ.

В верхней части прочного корпуса размещен одноцилиндровый ДС со всеми вспомогательными механизмами. Рабочее вещество внутреннего контура двигателя — гелий. Поддержание постоянной частоты вращения двигателя при изменении нагрузки на генератор осуществляется изменением давления гелия. При снижении нагрузки избыточное количество гелия перекачивается специальным компрессором в баллон высокого давления, при росте нагрузки газ поступает в двигатель из баллона. Теплообменник для охлаждения ДС размещен вне ПК; охлаждающая жидкость от внутреннего охладителя двигателя подается по трубопроводу.

Масса и объем ЗУ с ДС и ТА на фтористом литии в зависимости от мощности и автономности могут быть оценены по данным рис. 1.6. Показатели установок приведены без учета массы и объема ПК и устройств обеспечения нулевой плавуучести. Интересны данные о времени консервации ТА (рис. 1.7). ТА на фтористом литии размещен в сферическоцилиндрическом ПК. Рассмотрены варианты аккумулятора с экранно-вакуумной и волоконной теплоизоляцией (Мин-К) Начальная энергоёмкость ТА составляла 222 кВт·ч

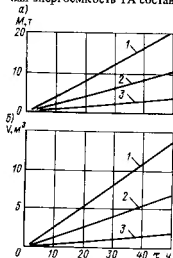


Рис. 1.6 Показатели энергетических установок с двигателем Стирлинга без учета прочного корпуса: а — масса; б — объем
1 — мощность 7,3 кВт; 2 — мощность 37 кВт; 3 — мощность 73 кВт

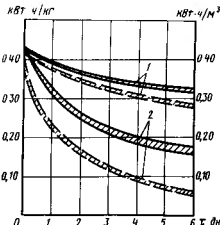


Рис. 1.7. Зависимость энергоемкости теплового аккумулятора на фтористом литии от времени консервации
1 — экранно-вакуумная теплоизоляция; 2 — волоконная теплоизоляция; — — — массовая энергоемкость; — — — объемная энергоемкость

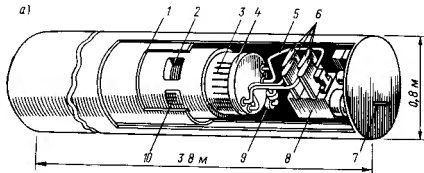
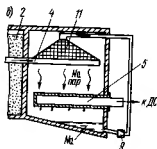


Рис. 1.8. Энергетическая установка мощностью 15 кВт с двигателем Стирлинга: а — компоновка в корпусе; б — принцип действия промежуточного теплообменника

- 1 — теплоизоляция; 2 — теплоаккумулирующий материал; 3 — промежуточный теплообменник; 4 — первичные тепловые трубы; 5 — вторичные тепловые трубы; 6 — нагревательные головки двигателя Стирлинга; 7 — выходной вал; 8 — двигатель Стирлинга; 9 — электромагнитный насос; 10 — индуктор; 11 — пористая структура



Примером использования ДС с ТА для технических средств освоения океана является установка мощностью 15 кВт, изображенная на рис. 1.8, а [10].

Установка размещена в сферическоцилиндрическом ПК; ее длина 3,8 м, диаметр корпуса 0,8 м, масса 2700 кг, энергоёмкость 420 кВт·ч.

В качестве ТАМ используется эвтектический сплав MgF_2 (33 %) — LiF (67 %). Особенностью данной конструкции установки является использование для передачи теплоты от ТА к ДС системы из тепловых труб, соединенных промежуточным теплообменником (рис. 1.8, б). 18 первичных тепловых труб перекачивают теплоту, запасенную ТАМ, в промежуточный теплообменник; четыре вторичные тепловые трубы (по одной на нагревательную головку каждого цилиндра) передают теплоту от промежуточного теплообменника к двигателю. В промежуточном теплообменнике циркулирует натрий, который забирается из его нижней части электромагнитным насосом, подается в капиллярную структуру на поверхности первичных тепловых труб, где испаряется, а затем, конденсируясь на вторичной тепловой трубе, передает ей теплоту. Первичные тепловые трубы выполнены длиной 2200, диаметром 30 мм. При температуре 973 К они передают 3,1 кВт. Вторичные тепловые трубы диаметром 45 мм с центральной артерией диаметром 6 мм при температуре 973 К передают 10 кВт.

ТА рассчитан на выработку 44 кВт тепловой энергии в течение 8 ч или 80 кВт в течение 4 ч. 4-цилиндровый ДС используется в качестве рабочего вещества гелий. Каждый цилиндр имеет раздельные нагревательные головки, в которых гелий нагревается парами натрия, подаваемыми по тепловой трубе.

Установки с паровой машиной. Паровая машина как преобразователь тепловой энергии в механическую находит применение в ряде

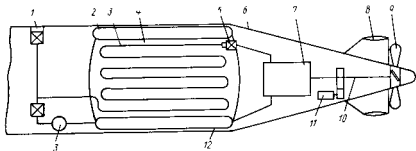


Рис 1.9 Энергетическая установка мощностью 23,5 кВт с паровой машиной
1 - водозаборник, 2 - теплоизоляция, 3 - трубки парогенератора, 4 - гидрид лития, 5 - выпускной клапан, 6 - корпус аппарата, 7 - паровая машина, 8 - насадка, 9 - винт, 10 - вал, 11 - генератор, 12 - конденсатор, 13 - вода новой насос

случаев благодаря хорошему приспособленности к переменным режимам возможности выдерживать большие перегрузки при малой частоте вращения вала. В качестве примера можно указать на установку исследователяского подводного аппарата (рис. 1.9) [2, 19]

Установка мощностью 23,5 кВт размещена в ПК, диаметр которого 0,483 м ТА на гидриде лития обеспечивает работу в течение 19 мин. Внутри ТАМ размещены трубки парогенератора. Вода в парогенератор подается циркуляционным насосом, обеспечивающим расход 1,14 кг/с. Вокруг ТА в кольцевом пространстве между теплоизоляцией ТА и корпусом помещен конденсатор, омываемый забортной водой. Нагрев гидрида лития осуществляется на судне-носителе. Масса ТАМ, конденсатора и парогенератора равна 82 кг. Поршневая паровая машина приводит в движение гребной винт в насадке. Регулирование вырабатываемой мощности производится клапаном в зависимости от глубины погружения. Масса поршневой машины 18 кг. Общий объем ЭУ 0,094 м³.

1.3. Энергетические установки с тепловыми аккумуляторами в системах жизнеобеспечения

Длительная и высокопроизводительная работа человека в море невозможна без создания нормальных условий на рабочем месте. Важнейшими показателями комфортности являются температуры окружающего воздуха и ограничивающих поверхностей. Создание комфортной температуры приобретает особое значение при работе человека под водой в автономном скафандре или подводном техническом средстве малых размеров. Окружающая вода с температурами 273 - 280 К является бесконечным стоком тепловой энергии, и обеспечение нормальных температурных условий невозможно без постороннего теплового источника. Аккумуляция тепловой энергии является одним из наиболее эффективных и простых в эксплуатации способов обеспечения энергией в подводных условиях.

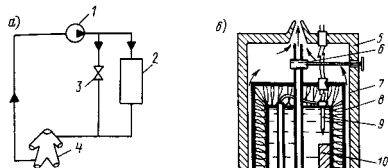


Рис 1.10 Система обогрева автономного скафандра с тепловым аккумулятором:
а - тепловая схема; б - тепло-вой аккумулятор

1 - насос; 2 - тепловой аккумулятор; 3 - переключатель; 4 - скафандр; 5 - корпус; 6 - регулирующий клапан; 7 - внешний канал; 8 - теплоизоляция; 9 - датчик температуры; 10 - теплопроводящее ребро; 11 - теплоаккумулирующий материал; 12 - внутренний канал, 13 - нагреватель

На рис. 1.10, а показана замкнутая система обогрева автономного скафандра, обеспечивающая выработку 1 кВт в течение 6 ч, которая включает в себя ТА, циркуляционный насос, устройства регулирования и скафандр с системой трубопроводов [26].

ТА обеспечивает нагрев теплоносителя (воды), проходящего по внутренним его каналам, в течение заданного времени без постороннего источника энергии. Циркуляционный насос небольшой мощности подает воду, нагретую в ТА к скафандру. Выбор конкретного вида привода насоса зависит от конструктивного решения других систем скафандра. Привод может осуществляться электродвигателем, получающим энергию от аккумуляторной батареи (АБ), термоэлектрического преобразователя, размещенного в ТАМ, или расширительной машинки, использующей воздух из баллона или пар, образующийся в ТА.

Устройство регулирования поддерживает постоянную температуру воды на входе в скафандр путем переноса части ее в обход ТА, а также осуществляет контроль давления в системе. Скафандр выполнен в виде 2-слойного костюма с устройствами распределения потока воды по основным его частям. Показатели эффективности системы обогрева в основном определяются конструктивным решением и энергетикой аккумулятора тепловой энергии.

ТА выполнен в виде цилиндрического корпуса внутри которого размещаются теплоаккумулирующая капсула в теплоизоляции, каналы (внешний и внутренний) для прохода охлаждающей воды, клапаны регулирования расхода (рис. 1.10, б). Капсула заполнена лавиномидом ТАМ, внутри которого помещены нагреватели.

сопротивления и защитных чехлах, рубка для прохода воды, теплопроводящие ребра и устройство контроля температуры. В качестве ТАМ могут применяться вещества с удельной теплотой плавления более 40 Вт·ч/кг и температурой плавления выше 320 К. Наиболее целесообразно использовать гидроксид лития, фторид лития или бериллия, имеющие удельную теплоту плавления до 250 Вт·ч/кг и температуру плавления 850–1700 К.

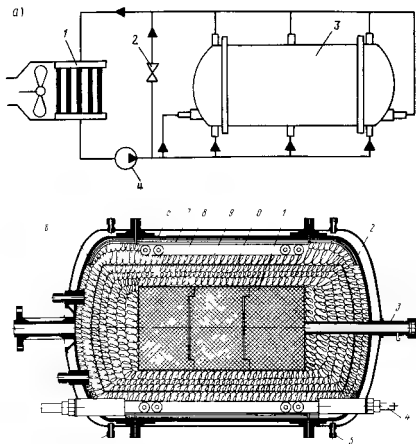


Рис. 1.11. Система обогревателя с тепловым графитовым аккумулятором: а) тепловая схема, б) — тепловой графитовый аккумулятор

1 — нагреватель воздуха; 2 — переключный клапан; 3 — тепловой графитовый аккумулятор; 4 — насос; 5 — передняя крышка; 6 — цилиндрический корпус; 7 — магнитопровод; 8 — индуктор; 9 — низкотемпературная теплоизоляция; 10 — высокотемпературная теплоизоляция; 11 — секция матрицы; 12 — задняя крышка; 13 — патрубок широметра; 14 — выход индуктора; 15 — подвод воды

Заряд ТА производится от внешнего источника электрической энергии с помощью нагревателей сопротивления, размещенных в слое ТАМ. Для этого он отсоединяется от системы обогрева скафандра, каналы теплоносителя заполняются инертным газом или вакуумируются и на нагреватель подключается к источнику тока. Процесс нагрева контролируют термопарами. После нагрева ТА может достаточно долго храниться в заряженном состоянии.

Применение внутреннего и внешнего каналов для прохода воды позволяет полностью использовать энергию, запасенную в ТАМ путем увеличения расхода воды через внутренний канал в процессе остывания. Этой же цели служат теплопроводящие ребра, повышающие эффективную теплопроводность ТАМ.

На рис. 1.11, а представлена система обогрева малого обитаемого подводного технического средства, разработанная на базе теплового графитового аккумулятора и водовоздушного теплообменника.

Подогрев воздуха в помещении осуществляется водой в компактном теплообменнике, размещенном в выходном патрубке системы вентиляции. Тепловой графитовый аккумулятор предназначен для нагрева воды, поступающей в теплообменник в течение заданного времени. Циркуляция воды осуществляется насосом малой мощности, использующим энергию АБ. Регулирование температуры на выходе из теплообменника производится клапаном переключения в обход ТА. ТА выполнен в виде цилиндра с днищами коробового сечения (рис. 1.11, б).

Стальной водоохлаждаемый корпус включает в себя переднюю крышку с фланцем, входом индуктора, штуцерами подвода и отвода воды и вспомогательной газовой системы, цилиндрическую часть с штуцерами подвода и отвода воды, заднюю крышку с выходом индуктора, патрубком широметра и штуцерами подвода и отвода воды. Внутри корпуса размещены графитовая матрица, состоящая из трех секций, многослойная теплоизоляция, индуктор и магнитопровод.

Нагрев ТА на судне обеспечения осуществляется системой тока повышенной частоты, состоящей из машинного преобразователя частоты, компенсирующих конденсаторов, подсистем контроля, управления и охлаждения. При заряде ТА отключается от системы обогрева с помощью быстроразъемных разъемов и подключается к системе индукционного нагрева. Нагретый ТА помещается в подводное техническое средство и включается в систему его обогрева.

Нагрев воды производится при прокачке ее через индуктор, днище и цилиндрическую часть, что позволяет регулировать количество подводимой к ней теплоты путем изменения расхода. Отличительной особенностью рассматриваемой системы обогрева является благоприятная зависимость количества вырабатываемой теплоты в процессе работы. В начальный промежуток времени, когда происходит прогрев помещения, количество вырабатываемой энергии значительно выше среднего и по мере прогрева оно снижается, что соответствует потребности в тепловой энергии.

1.4. Энергетические установки с тепловым аккумулятором для нагрева элементов конструкций

Одной из областей применения ТА следует считать технику высоких температур, где возникает необходимость генерирования высокотемпературного рабочего вещества. Это в первую очередь установки для сварки элементов конструкции, а также экспериментальные установки для испытания различных образцов судовой техники в условиях высоких температур. Применение теплового аккумулятирования в экспериментальных исследованиях позволяет создавать установки имеющие при небольшой мощности системы заряда ТА, во много раз большую мощность в импульсном режиме.

Описанная ниже установка с тепловым графитовым аккумулятором предназначена для исследований изделия и их элементов, работающих в среде инертного газа при температурах от нескольких сот градусов до 2500 3000 К. С использованием данной экспериментальной установки можно проводить исследования эффективности термоядерных преобразователей энергии, определение эффективности высокотемпературной теплоизоляции, определение совместимости конструкционных материалов при высоких температурах и т.п. Нагрев ТА осуществляется индукционным способом, что снимает ограничение по максимальной температуре матрицы, связанное с допустимой температурой нагревателя, работа в среде инертного газа снимает также проблему совместимости

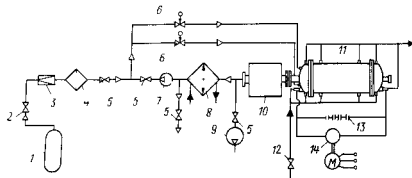


Рис 1.12 Схема экспериментальной установки с тепловым графитовым аккумулятором

1 – баллон, 2 – клапан высокого давления; 3 – редуктор; 4 – фильтр; 5 – клапаны, 6 – регулирующие клапаны, 7 – циркуляционный компрессор; 8 – охладитель, 9 – вакуумная насос, 10 – рабочий участок, 11 – тепловой графитовый аккумулятор, 12 – клапан системы охлаждения, 13 – компенсирующие конденсаторы, 14 – машинный преобразователь частоты

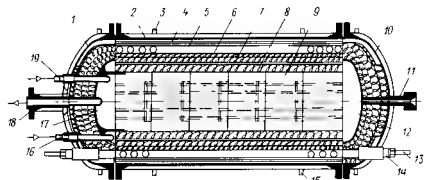


Рис 1.13 Тепловой графитовый аккумулятор

1 – передняя крышка; 2 – цилиндрический корпус; 3 – отвод воды, 4 – магнитопровод; 5 – индуктор, 6 – низкотемпературная изоляция, 7 – канал для прохода газа, 8 – высокотемпературная теплоизоляция, 9 – матрица, 10 – задняя крышка, 11 – патрубок смотрового окна, 12 – камера поворота, 13 – выход индуктора; 14 – электронизация, 15 – подвод воды, 16 – подвод газа в матрицу, 17 – камера смешения, 18 – отвод газа; 19 – подвод газа в камеру смешения

с рабочим веществом установки. Экспериментальная установка вы полнена в соответствии с тепловой схемой, позволяющей в зависимости от стоящих задач работать по открытому или закрытому циклу (рис. 1.12)

Работа по открытому циклу связана с использованием газа из баллонов и выбросом отработанного газа в атмосферу, что не всегда целесообразно вследствие больших расходов газа. Значительно уменьшить потери газа позволяет работа по замкнутому циклу. В этом случае потери давления в контуре компенсируются циркуляционным компрессором.

Регулируемые клапаны обеспечивают поддержание постоянной температуры газа на входе в рабочий участок в процессе работы установ ки. Охладитель газа предназначен для обеспечения работоспособности и снижения мощности циркуляционного компрессора. Питание индуктора осуществляется системой заряда, обеспечивающей выработку тока повышенной частоты и включающей в себя мотор-генератор, компенсирующие конденсаторы, блок управления контроля и защиты.

Тепловой графитовый аккумулятор обеспечивает нагрев газа до высокой температуры при прохождении его по каналам в теплоизоляции и в матрице (рис 1.13). К числу основных элементов аккумулятора относятся композитная теплоаккумулирующая матрица, многослойная теплоизоляция с каналом для прохода газа, индуктор, магнитопровод водоохлаждаемый корпус

Композитная матрица выполнена из нескольких секции, каждая из которых имеет каналы для прохода газа, крепежные элементы, наружное покрытие слоем теплоаккумулирующего и одновременно теплоизолирующего материала. Теплоизоляция выполнена из слоев графитовой ткани, графитового войлока и неорганической волокнистой теплоизоляции. Внутри слоя графитового войлока размещен канал для прохода газа в матрицу. Применение различных типов теплоизоляции и матриц значительно расширяет возможности ТА. Теплоизоляция отделена от индуктора слоем высокотемпературного электроизоляционного материала.

Индуктор выполнен одноходовым с водяным охлаждением и изолирован слоем электроизоляционного материала. Магнитопровод изготовлен из электротехнического сплава и прикреплен к корпусу электроизоляционным компаундом. Водоохлаждаемый корпус включает в себя переднюю крышку с патрубками подвода, отвода газа и выхода индуктора, цилиндрическую часть, заднюю крышку с патрубком смотрового окна и выходом индуктора.

В процессе работы ТА часть газа поступает в патрубок подвода газа в матрицу, проходит по каналу в теплоизоляции, затем по каналам в матрице и попадает в камеру смешения. Оставшееся количество газа направляется непосредственно в камеру смешения, чем достигается заданная температура в выходном патрубке. При остывании ТА расход газа через матрицу увеличивается, а в камеру смешения снижается. Температура газа замеряется термопарами, а температура матрицы — пирометром.

2 ТЕПЛОВОЙ ГРАФИТОВЫЙ АККУМУЛЯТОР — ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ИСТОЧНИК ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

2.1. Сравнительные характеристики тепловых аккумуляторов

Для транспортных установок наиболее приемлемым является аккумулялирование тепловой энергии как за счет теплоты плавления и теплоемкости плавящегося ТАМ, так и за счет только теплоемкости неплавящегося ТАМ, что в основном связано с полной обратимостью процессов плавления и нагрева ТАМ.

ТАМ должны обладать возможностью многократных зарядов и разрядов при постоянном уровне тепловой эффективности, высокой энергоемкостью единицы массы, полной обратимостью фазовых превращений высокой начальной температурой.

Особенности ТА, использующего процесс плавления ТАМ максимальной температурой нагрева соответствует температуре плавления ТАМ, т. е. $T_H = T_{пл}$;

располагаемое количество теплоты, запасенное в ТАМ и подлежащее преобразованию, зависящее от нижнего температурного уровня T_3 (максимальная температура цикла преобразователя энергии),

$$q_p + q_c + q_n + c_n(T_H - T_3) + q_n$$

где q_c — количество теплоты, запасенное за счет теплоемкости ТАМ в диапазоне температур от T_3 до T_H , q_n — теплота плавления ТАМ;

c_n — средняя теплоемкость плавящегося ТАМ, плавление происходит изотермически, при постоянном давлении аккумулятор позволяет накапливать и высвобождать тепловую энергию при постоянном температурном уровне,

— значения скрытой теплоты плавления известных ТАМ обеспечивают приемлемые массогабаритные характеристики аккумулятора; в процессе остывания и кристаллизации ТАМ происходит изменение его объема (усадка),

большинство ТАМ (фториды окислы) в расплавленном состоянии коррозионно активны.

Особенности ТА, запасующего тепловую энергию за счет теплоемкости неплавящегося ТАМ.

максимальная температура нагрева определяется свойствами используемого ТАМ и техническими возможностями,

располагаемое количество теплоты в рассматриваемом диапазоне температур определяется только теплоемкостью ТАМ $q_p + c_T(T_H - T_3)$ где c_T — средняя теплоемкость неплавящегося (твердого) ТАМ,

неизотермичность рабочего процесса (если не предусмотреть специальную систему регулирования),

требуемая высокая (более 1500 К) начальная температура ТАМ с целью обеспечения приемлемых массогабаритных показателей.

В ТА комбинированного типа используется теплота двух различных ТАМ плавящегося и неплавящегося.

Располагаемое количество теплоты в рассматриваемом температурном интервале $q_p + c_T(T_H - T_3)(1 - \mu_n) + [c_n(T_H - T_3) + q_n]\mu_n$, где μ_n — массовая доля плавящегося ТАМ.

Теплоаккумулирующие матрицы имеют следующие удельные массовые показатели [6]:

матрица 1 в зависимости от конструкции на 50–80 % объема заполнена плавящимся ТАМ, обладающим высшей теплотой плавления при заданном температурном уровне,

матрица 2 на 90 % объема заполнена графитом, обладающим высокой теплоемкостью и термической стабильностью до температуры ~ 4000 К.

Таблица 2.1 Характеристики матрицы 1

Характеристика	Теплоаккумулирующие материалы				
	LiF	Be	Li ₂ O	BeO	MgO
Температура плавления T_m , К	1123	1555	2000	2800	3070
Разность температур $T_m - T_3$, К	223	655	1100	1900	2173
Удельная теплота плавления q_p , кДж/кг	1044	1512	1962	3415	1922
Средняя теплоемкость c_p , кДж/(кг·К)	2.54	2.7	2.35	0.43	1.33
Располагаемая теплота q_p , кДж/кг	1610	3280	4551	4232	4817
Удельная энергоёмкость $кВт·ч/кг$	0.447	0.911	1.264	1.176	1.338
Плотность ТАМ ρ_T , г/см ³	1800	1848	2103	3303	3650

Таблица 2.2 Характеристики графитовых матриц 2

Характеристика	Начальная температура T_n , К				
	1123	1555	2000	2800	3070
Разность температур $T_n - T_3$, К	223	655	1100	1900	2173
Средняя теплоемкость c_p , кДж/(кг·К)	1.77	1.846	1.89	2.01	2.12
Располагаемая теплота q_p , кДж/кг	394.7	1209	2079	3809	4600
Удельная энергоёмкость $кВт·ч/кг$	0.1096	0.336	0.5775	1.058	1.278
Плотность ТАМ ρ_T , кг/м ³	1800	1800	1800	1800	1800

– матрица 3 состоит из графита занимающего 50 % объема, и плавящегося ТАМ, обладающего вышней теплотой плавления при заданном температурном уровне и занимающего 30 % объема.

Начальная температура всех матриц соответствует температуре плавления плавящегося ТАМ, конечная принята равной 900 К из условия обеспечения приемлемого КПД преобразователя энергии. Исходные данные для оценки эффективности теплоаккумулирующих матриц приведены в табл. 2.1–2.3 [13].

Таблица 2.3 Характеристики матрицы 3

Характеристики	Теплоаккумулирующие материалы				
	LiF + C	Be + C	Li ₂ O + C	BeO + C	MgO + C
Массовая доля плавящегося ТАМ M_n	0.375	0.381	0.412	0.503	0.549
Располагаемая теплота q_p , кДж/кг	850.4	1998	1097	4022	4719
Удельная энергоёмкость $кВт·ч/кг$	0.236	0.555	0.860	1.117	1.311

В качестве показателя принята удельная масса ТАМ $кг/(кВт·ч)$ $m_{ТАМ} = 3600/q_p$.

На рис. 2.1 приведены зависимости, позволяющие оценить эффективность рассмотренных матриц. Увеличение температуры нагрева приводит к существенному снижению удельной массы, особенно для матрицы 2. Зависимости относительной удельной массы матриц $m_{ТАМ}$, равной отношению массы сравниваемой матрицы к удельной массе матрицы 1, приведены на том же рисунке. В рассматриваемом диапазоне начальных температур относительная удельная масса матрицы 2 равна 4,1–1,05, а матрицы 3 – 1,9–1,02.

До уровня температуры 1500 К в качестве теплоаккумулирующих материалов применяются в основном соли, которые обладают умеренной коррозионной активностью по отношению к конструкционным материалам. Учитывая лучшие массогабаритные показатели ТА с плавящимся ТАМ их применение наиболее целесообразно в указанном диапазоне температур.

При температурах более 1500 К с точки зрения теплофизических свойств ТАМ перспективными являются металлы и их окислы. Вместе с тем они весьма коррозионно активны по отношению к конструкционным материалам, что сдерживает их применение на современном этапе. Поэтому в диапазоне температур 1500–2000 К

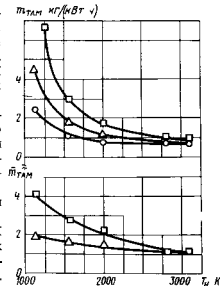


Рис. 2.1 Основные показатели теплоаккумулирующих матриц
○ – матрица 1 (коэффициент заполнения объема 0,5), □ – матрица 2; △ – матрица 3

оказывается целесообразным применение ТА комбинированного типа; при более высоких температурах перспективнее следует считать неплавящегося ТАм в первую очередь графит. Энергоемкость графита при $T_H = 3070$ К практически равна таковой для плавящегося ТАм. При $T_H = 3500$ К эффективность графитового аккумулятора превосходит другие типы ТА, в связи с чем в дальнейшем рассматриваются только графитовые аккумуляторы.

2.2. Показатели эффективности теплового графитового аккумулятора

Рассмотрим определение показателей эффективности теплового графитового аккумулятора в ПК (рис. 2.2). Основными элементами, определяющими эффективность ТА, являются композитная теплоаккумулирующая матрица, многослойная теплоизоляция, камера смешения, индуктор, магнитопровод, корпус. Композитная теплоаккумулирующая матрица с каналами обеспечивает нагрев газа до высокой температуры. Периферийный слой матрицы выполнен из пирогرافита, являющимся ТАм и теплоизоляцией одновременно.

Камера смешения обеспечивает поддержание заданной постоянной температуры газа на выходе из ТА путем смешения двух потоков газа: первичного, нагретого в теплоаккумулирующей матрице, и вторичного, поступающего непосредственно в камеру смешения. Многослойная теплоизоляция с каналом для прохода газа обеспечивает расчетное значение потерь теплоты в окружающую среду и подвод газа к матрице. Матрица нагревается индукционным способом. Индуктор окружен магнитопроводом, защищающим корпус от нагрева вихревыми токами.

Проектирование высокоэффективного теплового графитового аккумулятора, определение абсолютных и относительных его показателей требуют решения следующих задач.

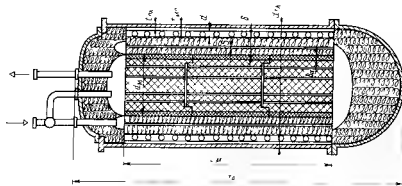


Рис. 2. Теплового графитовый аккумулятор

определения энергоемкости ТАм массы и габаритов матрицы; выбора параметров теплоизоляции, при которых достигаются минимальные значения потерь теплоты в окружающую среду с учетом конструктивных и технологических ограничений;

определения расходов первичного и вторичного газа, обеспечения заданную и постоянную во времени температуру газа на выходе из ТА,

определения количества отверстий в матрице для обеспечения нагрева газа до температуры, близкой к температуре матрицы, при ограниченных максимальных потерях давления.

Масса матрицы определится в первом приближении по зависимости

$$M_{ТАМ} = \frac{3600 N_{п\tau}}{\eta_{п}(1 - \xi_{сc})c_{p}(T_{H} - T_{3})}$$

где $N_{п}$ – полезная мощность, кВт, τ – автономность, ч; $\eta_{п}$ – эффективный КПД преобразования тепловой энергии в электрическую; $\xi_{сc}$ – относительные потери теплоты в окружающую среду; c_{p} – средняя теплоемкость графита в интервале температур $T_{H} - T_{3}$, кДж/(кг·К); T_{H}, T_{3} – высшая и низшая температуры нагрева матрицы, К.

Средняя теплоемкость графита

$$c_p = \frac{H(T_H) - H(T_3)}{T_H - T_3}$$

Энтальпия графита $H(T)$ в интервале температур 600–3600 К определяется с погрешностью $\pm 1,5\%$.

Объем, длину и диаметр матрицы ТА в первом приближении определяют по формулам: $V_{м} = M_{ТАМ}/\rho_{г}$; $L_{м} = 4V_{м}/(\pi d_{м}^2)$; $d_{м}, d_{ТА} = 2(\delta + d_{и} + t_{мп} + t_{ПК})$, где $\rho_{г}$ – средняя плотность матрицы; $d_{м}, d_{ТА}$ – диаметры матрицы ТА; $t_{ПК}, t_{мп}$ – толщины прочного корпуса и магнитопровода; $d_{и}$ – диаметр трубки индуктора с изоляцией; δ – толщина изоляции с каналом для прохода газа.

Массы пирогرافита и графита $M_{пг} = \pi(d_{м} - \delta_{пг})\delta_{пг}L_{м}\rho_{пг}k_{пг}$; $M_{г} = \pi/4(d_{м} - 2\delta_{пг})^2L_{м}\rho_{г}k_{г}$; где $\delta_{пг}$ – толщина слоя пирогرافита; $\rho_{пг}, \rho_{г}$ – плотности пирогرافита и графита; $k_{пг}, k_{г}$ – коэффициенты, учитывающие уменьшение массы пирогرافита и графита за счет отверстий для прохода газа и других конструктивных особенностей.

С учетом зависимости $M_{ТАМ} = M_{пг} + M_{г}$ необходимая плотность графита

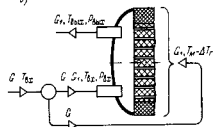
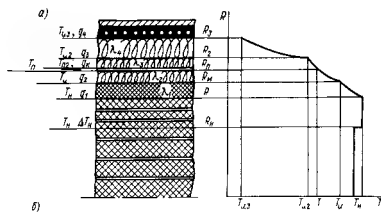


Рис. 2.3 К определению эффективности теплового графитового аккумулятора *a* — к расчету потерь в окружающую среду, *б* — к расчету камеры смешения

$$\rho_{\Gamma} = \frac{\rho_{\Gamma} \cdot 4(1 - \frac{\delta_{\Gamma}}{2\delta_{\Gamma}}) \delta_{\Gamma} \rho_{\Gamma} \lambda_{\Gamma}}{(1 - \frac{\delta_{\Gamma}}{2\delta_{\Gamma}})^2 k_{\Gamma}} \delta_{\Gamma} \frac{\delta_{\Gamma}}{d_{\Gamma}}$$

При учете широкого диапазона изменения плотности графита требуемая его плотность всегда может быть достигнута. В процессе индукционного нагрева матрицы в поверхностных слоях происходит выделение тепловой энергии, внутренние слои нагреваются за счет теплопроводности от поверхностных слоев. Условный радиус, ниже которого не происходит тепловыделение, R_H зависит от свойств графита и частоты тока. Принято считать, что выше радиуса R_H тепловыделение равномерно. В процессе нагрева матрицы происходят потери теплоты через теплоизоляцию в окружающую среду. Допустим, что распределение температуры в слое пирографита и изоляции соответствует стационарному состоянию, что достигается выдержкой ТА после нагрева некоторое время в рабочем состоянии.

Уточним массу и длину матрицы с учетом распределения температур в начальный момент времени (рис. 2.3, *a*). Распределение температуры пирографита по радиусу определим при допущении о линейном законе изменения его теплопроводности в диапазоне температур 2500–3500 К

$$T_{\Gamma}(R) = \sqrt{\left(\frac{1}{B} + T_H\right)^2 + \frac{2\lambda_{\text{ср}}}{\lambda_0 B} (T_H - T_{\Gamma})} \frac{\ln(R/R_1)}{\ln(R_M/R_1)} - \frac{1}{B}$$

$\lambda_{\text{ср}} = \lambda(T_H + T_{\Gamma}/2)$; $\lambda(T) = \lambda_0(1 + BT)$ где T_H и T_{Γ} — температуры наружной и внутренней границ слоя пирографита; λ_0 и B — коэффициенты.

Энергоемкость пирографита с учетом начального распределения температур $Q_{\text{пг}} = 2\pi\rho_{\text{пг}}L_M \int_{R_M}^{R_1} [H(T_{\text{пг}}) - H(T_3)] R dR$ определяется численным интегрированием

Температурное поле по радиусу матрицы можно представить в виде

$$T_M(R) = \begin{cases} T_H & R > R_H \\ T_H - \Delta T_M & R < R_H \end{cases}$$

Энергоемкость графита с учетом начального распределения температур $Q_{\Gamma} = M_{\Gamma} [H(T_H) - H(T_3)] - M_{\Gamma} [H(T_H) - H(T_H - \Delta T_M)] (R_H/R_1)^2$

Масса и длина матрицы с учетом начального распределения температур определяются по формулам $M_M = M_{\text{ТАМ}} Q_M / (Q_{\Gamma} + Q_{\text{пг}})$; $L_M = (L_M) \times M_M / M_{\text{ТАМ}}$, где $Q_M = M_{\text{ТАМ}} [H(T_H) - H(T_3)]$ (L_M) — энергоемкость и длина матрицы в первом приближении.

Расход газа, проходящего через матрицу, определяется в предположении полного перемешивания в камере смешения (рис. 2.3, *б*). При этом температура газа на выходе из матрицы ниже температуры матрицы на ΔT_{Γ} . Из уравнения теплового баланса камеры смешения получим

$$G_1 G \frac{T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}}{T_M \Delta T_{\Gamma} - T_{\text{вх}}}$$

Определение потерь теплоты в окружающую среду производится на базе локально-одномерной квазистационарной модели процесса теплопередачи через теплоизоляцию. При этом и вся продолжительность работы ТА разбивается на элементарные временные участки, в пределах которых температура графитовой матрицы принимается постоянной, а распределение температуры по толщине теплоизоляции — стационарным.

Рассматривая ТА в данный момент времени, разобьем его на элементарные участки по длине, в пределах которых примем линейное распределение температур и свойств по длине. Потери теплоты в окружающую среду составляют $Q_{0,c} = Q_{0,c1} + Q_{0,c2}$, где $Q_{0,c}$ — потери теплоты с цилиндрической части ТА; $Q_{0,c1}$, $Q_{0,c2}$ — потери теплоты с переднего и заднего горючих днищ ТА. Потери теплоты с цилиндрической части

ГА в соответствии с локально-одномерной квазистационарной моделью определим интегрированием тепловых потерь с каждого элементарного

$$\text{временного участка } Q_{\Delta t} = 3600 \int_0^{\tau} Q(t) dt \approx 3600 \sum_{i=1}^k Q_i(t) \Delta t$$

Тепловые потери в окружающую среду в данный момент времени определяются интегрированием тепловых потоков с каждого элементарного участка по длине в данный момент времени:

$$Q_j(t) = \int_0^{l_M} q(l, t) dl \approx \sum_{i=1}^n q(l, t) \Delta l \quad \text{где } k \text{ и } n \text{ — количество элементар}$$

ных участков по времени и длине ГА; Δt , Δl — размеры элементарных участков по времени и по длине матрицы ГА, $q(l, t)$ — значение теплового потока в окружающую среду с данного элементарного участка в данный момент времени. Суммарные потери теплоты со сферических дншц определяются интегрированием по времени тепловых потерь с их поверхности в окружающую среду; при этом тепловые потоки определяются в предположении сферической симметрии поля температур в теплоизоляции дншц.

Для конфигурации многослойной теплоизоляции (см. рис. 2.3, а) уравнения тепловых потоков запишем в виде $q_1 = q_2$; $q_3 = q_4$; $q_2 = -q_4$, q_3 , q_4 — $\alpha F \Delta T_{\text{ср}}$. Раскрывая значения тепловых потоков, получим систему уравнений относительно неизвестных температур T_{n1} , T_{n2} , T_n , T_{r1} . Тепловой поток в окружающую среду $q(l, t) = 2\pi \lambda_A (T_{n2} - T_{r2}) \Delta l / \ln(R_2/R_1)$

Аналогично определяются тепловые потоки, температуры теплоизоляции и газа при расположении канала для прохода газа между другими слоями теплоизоляции

Последовательно рассматривая все элементарные участки по длине в данный момент времени и все элементарные участки по времени определяем потери теплоты в окружающую среду.

Относительные потери теплоты в окружающую среду определяются по зависимости $\zeta_{0,c} = Q_{0,c} / (Q_{\text{пл}} + Q_r)$.

Масса теплового графитового аккумулятора в ПК определится по выражению $M_{\text{ГА}} = M_M + M_{i3} + M_n + M_{\text{МП}} + M_{\text{ПР}}$, где M_{i3} , M_n , $M_{\text{МП}}$, $M_{\text{ПР}}$ — массы изоляции, индуктора, магнитопровода, ПК.

Удельная масса теплового графитового аккумулятора $\pi_{\text{ГА}} = M_{\text{ГА}} / (V_{\text{ПР}})$.

Рассмотренная математическая модель является основой алгоритма определения эффективности теплового графитового аккумулятора. Исходными данными к расчету являются параметры ГА, полученные при оптимизации энергетического модуля в целом [6] — $d_{\text{ГА}}$, $\delta_{\text{нз}}$, $T_{\text{вых}}$

$$T_3, T_n, \lambda_{\text{пл}}, \tau, \rho_T, T_{0,c}, \eta_{\text{пл}}, G_T, T_{\text{вх}}, p_{\text{вх}}.$$

Задача оптимизации параметров теплового графитового аккумулятора состоит в таком выборе параметров, при котором обеспечивается минимальная его удельная масса $\pi_{\text{ГА}}$. К числу оптимизируемых относятся, прежде всего, такие параметры, как тип теплоизоляции, количество и толщина слоев, координаты канала для прохода газа.

В связи с тем, что некоторые параметры в теплоизоляции являются дискретными, задачу оптимизации целесообразно решать в два этапа. Для каждого типа теплоизоляции определять оптимальные непрерывные параметры, а выбор оптимального типа теплоизоляции производить сопоставлением ряда вариантов. Высокие температуры нагрева матрицы требуют применения в качестве высокотемпературного слоя эффективных типов теплоизоляции на базе углеграфитовых материалов. Это позволяет решить проблему совместимости материалов матрицы и теплоизоляции

Одним из таких материалов является пирографит, образующийся осаждением углерода на разогретых до 2700 К графитовых поверхностях из газообразных углеводородов той же температуры. Пирографит отличается резко выраженной анизотропией свойств: он имеет низкую теплопроводность в направлении, перпендикулярном плоскости осаждения, и высокую (превышающую теплопроводность меди) в плоскости осаждения. Плотность пирографита достигает 2200–2260 кг/м³ и приближается к теоретической плотности кристалла углерода. Прочность пироуглерода превышает прочность графита в 10 раз и возрастает с ростом температуры, при высоких температурах он становится пластичным материалом. Коэффициент теплопроводности пирографита при температурах 2100–3500 К возрастает практически линейно от 1.0 до 1.8 Вт/(м·К). Недостатком пирографита является сложность получения изделий большой толщины. Применение пирографита целесообразно в качестве теплоизоляции в диапазоне высоких температур порядка 2800–3500 К

При более низких температурах целесообразно применение графитового войлока, получаемого термической обработкой тканых и нетканых текстильных материалов. Плотность войлоков составляет 40–150 кг/м³, а коэффициент теплопроводности при температурах 2000–3000 К изменяется от 0.6 до 1.7 Вт/(м·К). Прочность графитового войлока возрастает с ростом температуры. Достоинством войлока является простота обработки и изготовления теплоизоляции.

Теплоизоляция на базе волокон двуокиси циркония при наличии стабилизирующих добавок других окислов применяется до температур 2600 К и имеет самый низкий коэффициент теплопроводности при этих температурах [17]. Низкая теплопроводность этой изоляции обусловлена непрозрачностью волокон к инфракрасному излучению. Плотность волокон из двуокиси циркония составляет 320 кг/м³. Коэффициент теплопроводности в диапазоне температур 1000–2600 К возрастает от 0.12

до 0,65 Вт/(м·К). Недостатком циркониевого войлока является сложность его изготовления.

В зоне низких температур теплоизоляции может также применяться холст из кварцевого волокна. Плотность холста составляет 50–100 кг/м³, коэффициент теплопроводности в диапазоне температур 500–1200 К равен 0,06–0,12 Вт/(м·К). Производство кварцевого холста значительно проще производства циркониевого войлока, что делает его более доступным для теплоизоляции при низких температурах.

Определение оптимальных параметров ТА выполнено применительно к следующим типам теплоизоляции: пирографит – графитовый войлок – циркониевый войлок; пирографит – графитовый войлок – холст из кварцевого волокна; пирографит – графитовый войлок; графитовый войлок – циркониевый войлок; графитовый войлок – холст из кварцевого волокна; графитовый войлок.

Исходные параметры ТА, характерные для энергетического модуля, приняты равными: $N_{\text{п}}=75$ кВт, $\tau=50$ ч, $d_{\text{т}}=1,9$ м, $\delta_{\text{из}}=0,16$ м, $T_{\text{вх}}=1200$ К, $T_{\text{н}}=3500$ К, $\rho_{\text{т}}=1700$ кг/м³, $T_{0,с}=287$ К, $\eta_{\text{п}}=0,4$, $G_{\text{т}}=2,85$ кг/с, $T_{\text{вх}}=940$ К, $P_{\text{вх}}=0,3$ МПа.

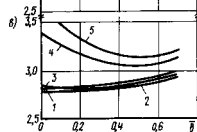


Рис. 2.4 Зависимости удельной массы теплового графитового аккумулятора от толщины теплоизоляции и разности температур для различных ее типов а – пирографит графитовый войлок – циркониевый войлок; б – пирографит графитовый войлок – кварцевый холст; в – пирографит – графитовый войлок
1 – $\Delta T_{\text{пг}}=900$ К; 2 – $\Delta T_{\text{пг}}=700$ К; 3 – $\Delta T_{\text{пг}}=500$ К; 4 – $\Delta T_{\text{пг}}=100$ К; 5 – $\Delta T_{\text{пг}}=0$ К

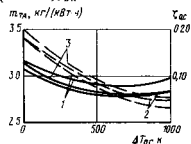


Рис. 2.5 Зависимости удельной массы теплового графитового аккумулятора и относительных потерь тепла при оптимальной толщине изоляции типов

1 – пирографит – графитовый войлок – циркониевый войлок, 2 – пирографит – графитовый войлок – кварцевый холст, 3 – пирографит графитовый войлок, — $m_{\text{ТА}} - f(\Delta T_{\text{пг}})$ — $m_{\text{acc}} - f(\Delta T_{\text{пг}})$

Свойства материалов слоев приняты по [17]. Толщины слоев теплоизоляции задаются косвенно (температурами границ слоев), температура внутреннего слоя теплоизоляции принимается равной температуре нагрева. Координаты канала для прохода газа определяются относительной величиной $\delta = (R_{\text{п}} - R_{\text{м}})/\delta_{\text{вх}}$. Варианты теплоизоляции без пирографита рассматриваются как частный случай вариантов с пирографитом при $\Delta T_{\text{пг}} = T_{\text{н}} - T_{\text{м}1} = 0$.

Как следует из полученных результатов (рис. 2.4), существует оптимальное значение δ , изменяющееся от 0 до 0,6 в рассмотренном диапазоне $\Delta T_{\text{пг}}$. Наличие оптимального значения δ связано с тем, что в области высоких температур теплоизоляции (малые значения δ) газ нагревается более интенсивно и до более высокой температуры, что ухудшает охлаждение теплоизоляции и повышает потери теплоты в окружающую среду. Однако в процессе остывания матрицы температура этих слоев выше температуры газа более продолжительное время, что приводит к снижению потерь теплоты в окружающую среду.

Уменьшение толщины слоя пирографита (и соответственно $\Delta T_{\text{пг}}$) приводит к росту температуры $T_{\text{н}1}$, повышению температурных напоров в канале для прохода газа и более быстрому его нагреву. Это ухудшает охлаждение изоляции и увеличивает потери теплоты в окружающую среду. Вследствие этого оптимальное значение δ возрастает. Оптимальное значение толщины пирографита является следствием снижения потерь теплоты в окружающую среду при росте $\Delta T_{\text{пг}}$ и одновременного уменьшения количества теплоты, запасенного в матрице. Сравнение рассмотренных типов теплоизоляции при оптимальном значении их параметров показало, что применение теплоизоляции без пирографита приводит к значительному росту $\xi_{0,с}$ и повышению удельной массы ТА (рис. 2.5).

Эффективность рассмотренных вариантов теплоизоляции с пирографитом достаточно близка как по потерям теплоты, так и по удельной массе ТА. Несколько меньшие потери теплоты у варианта пирографит – графитовый войлок – циркониевый войлок являются следствием меньшего коэффициента теплопроводности циркониевого войлока по сравнению с графитовым войлоком и более высокой температуры применения, чем у кварцевого холста. Однако более высокая его плотность приводит к незначительному возрастанию удельной массы ТА. С целью получения обобщенной информации об удельной массе ТА и потерях теплоты в окружающую среду определены оптимальные параметры теплового графитового аккумулятора (при заданных внешних исходных данных) в широком диапазоне изменения мощности и автономности для варианта теплоизоляции пирографит – графитовый войлок – циркониевый войлок.

Влияние мощности и автономности на показатели ТА определены для значений $N_{\text{п}}=30, 75, 150$ кВт, $\tau=15, 50, 100$ ч при $\Gamma_{\text{пк}}=10$ мм (рис. 2.6). Удельная масса теплового графитового аккумулятора с прочным корпусом в зависимости от автономности составляет 3,8–3,2 кг/(кВт·ч) при $V_{\text{н}}=30$ кВт и примерно 2,7 кг/(кВт·ч) при $N_{\text{п}}$

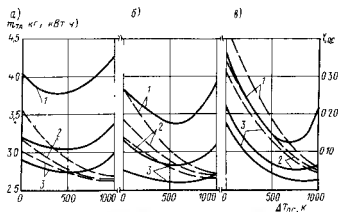


Рис. 2.6 Зависимости $m_{TA} = f(\Delta T_{ПГ}, \tau)$, $\eta = f(\Delta T_{ПГ}, \tau)$ при $l_{ПГ} = 10$ мм (теплоизоляция: пирогرافит – графитовый войлок (циркониевый войлок)) а – $\tau = 15$ ч, б – $\tau = 50$ ч, в – $\tau = 100$ ч

1 – $N_{ПГ} = 30$ кВт, 2 – $N_{ПГ} = 75$ кВт, 3 – $N_{ПГ} = 150$ кВт
 $\eta = f(\Delta T_{ПГ}, \tau)$, $m_{TA} = f(\Delta T_{ПГ}, \tau)$

Таблица 2.4 Эффективность тепловых аккумуляторов

Параметр	Мощность, кВт, автономность, ч			
	$N_{ПГ} = 30$, $\tau = 15$	$N_{ПГ} = 75$, $\tau = 50$	$N_{ПГ} = 150$, $\tau = 100$	$N_{ПГ} = 300$, $\tau = 100$
Толщина слоя изоляции, мм				
пирогرافит	35	0	188	0
графитовый войлок	30	62	73	138
циркониевый войлок	50	18	107	42
Потери теплоты, кВт				
максимальные	28,1	68,7	95,7	573
среднеинтегральные	10,7	20,8	39,1	171
относительные	0,116	0,208	0,091	0,302
Масса, кг				
графита	781	1006	14 550	38 030
пирогرافита	145	0	14 270	0
графитового войлока	34	45	506	1 270
циркониевого войлока	60	44	1 883	1 077
индуктора	86	91	1 040	1 343
магнитопровода	203	213	2 215	2 826
прочного корпуса	400	420	4 376	5 584
суммарная	1699	1 819	38 840	50 130
Диаметр ТА, м	1,25	1,25	2,2	2,2
Размеры матрицы, м				
диаметр	1,00	1,00	1,75	1,75
длина	0,68	1,00	7,02	9,26
Удельная масса ТА, кг (кВт ч)	3,78	4,04	2,59	3,34

150 кВт, а относительные потери теплоты в окружающую среду – 0,12 и 0,1 и 0,05 соответственно. Зависимость удельной массы ТА и относительных потерь в окружающую среду от $\Delta T_{ПГ}$ при оптимальном значении δ в рассмотренном диапазоне $N_{ПГ}$ и τ приведена на том же рисунке. Оптимальное значение $\Delta T_{ПГ}$ слабо зависит от мощности и изменяется от 400–500 К при $\tau = 15$ ч до 700–900 К при $\tau = 100$ ч.

Основные параметры ТА для двух вариантов теплоизоляции (пирогرافит – графитовый войлок, циркониевый войлок и графитовый войлок – циркониевый войлок) при оптимальных значениях $\Delta T_{ПГ}$ приведены в табл. 2.4. Отказ от пирогرافита приводит к существенному увеличению потерь в окружающую среду и росту удельной массы ТА на 6–34 % в зависимости от мощности и автономности. Более слабое влияние отсутствия пирогرافита наблюдается при больших мощностях и малых автономностях.

Таким образом, сравнение 6 типов теплоизоляции показало, что для достижения минимальной удельной массы теплового графитового аккумулятора требуется применение многослойной теплоизоляции с каналом для прохода газа и первым слоем, выполненным из пирогرافита. Достигнутые показатели теплового графитового аккумулятора указывают на его высокую эффективность как автономного источника тепловой энергии.

2.4. Выбор режима нагрева аккумулятора

Нагрев матрицы теплового графитового аккумулятора осуществляется индукционным способом, обладающим рядом достоинств:

- передача электрической энергии непосредственно в матрицу ТА позволяет осуществить прямой нагрев и значительно увеличить скорость нагрева по сравнению с нагревателями косвенного действия;
- максимальный уровень температур, достигаемых при индукционном нагреве, ограничивается только применяемыми конструкционными материалами;

- передача электрической энергии в матрицу не требует контактов и устройств, что значительно упрощает конструкцию ТА;

- индукционный метод нагрева широко применяется в промышленности, серийно выпускается оборудование для индукционных нагревательных установок, работающих на различных частотах тока.

Максимальная энергоэффективность теплового графитового аккумулятора достигается при обеспечении минимального отклонения температуры от заданной во всем объеме матрицы. В то же время для индукционного метода нагрева характерно неравномерное выделение тепловой энергии как в радиальном, так и в осевом направлении. Это делает необходимым выбор таких режимов нагрева, величина частоты тока и полудюймовой мощности, которые обеспечивали бы требуемую равномерность температурного поля матрицы ТА в конце процесса нагрева при минимальной его продолжительности. Предварительно эти величины можно определить, используя зависимости, применяемые при расчетах промышленных индукционных нагревательных установок, и учитывая специфику работы

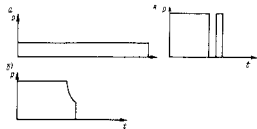


Рис 2.7 Виды режимов нагрева *а* — с постоянной удельной мощностью, *б* — ускоренный; *в* — с релейным законом изменения мощности

Режим нагрева с постоянной во времени удельной мощностью позволяет получить однородное температурное поле в матрице ТА в любой момент нагрева, не требует регулирующих воздействий на систему индукционного нагрева. Однако для него характерны низкие уровни значений подводимой к индуктору мощности, что увеличивает продолжительность нагрева (рис 2.7, *а*)

Ускоренный режим нагрева (рис 2.7, *б*) отличается тем, что на начальном этапе процесса нагрева матрицы осуществляется при повышенных значениях удельной мощности, благодаря чему достигается быстрый рост температуры на поверхности матрицы и возникают большие градиенты температуры по объему матрицы. При достижении заданной температуры на поверхности матрицы величина удельной мощности снижается таким образом, чтобы температура на поверхности матрицы оставалась постоянной. При этом происходит выравнивание температурного поля матрицы ТА. Ускоренный режим нагрева позволяет сократить продолжительность процесса нагрева матрицы ТА по сравнению с нагревом при постоянной удельной мощности, однако его применение ограничивается необходимостью создания сложной системы управления процессом нагрева и недопустимостью больших градиентов температур из-за возникновения опасных термических напряжений.

Режим нагрева с релейным законом изменения удельной мощности (рис 2.7, *в*) позволяет получить заданное распределение температуры по объему матрицы за минимальное время, так как представляет собой чередование периодов нагрева при высоких значениях удельной мощности с периодами остывания. Нагрев матрицы ТА и выравнивание ее температурного поля происходят в этом случае при максимальных градиентах температуры. Данный режим нагрева легко организуется на практике путем периодического включения и выключения источника питания индуктора.

Очевидно, что при выборе режима нагрева матрицы ТА следует отдавать предпочтение режиму с релейным законом изменения удельной мощности. Однако для графитовых ТА характерны близкие значения

индукционного нагревателя как элемента теплового графитового аккумулятора тора

В практике индукционного нагрева различают три вида режимов нагрева: нагрев с постоянной во времени удельной мощностью; ускоренный режим нагрева; нагрев с релейным законом изменения величины удельной мощности.

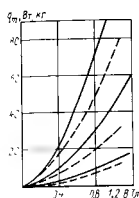


Рис 2.8 Зависимость удельных потерь от амплитуды магнитной индукции
— толщина листа 0,1 мм
--- толщина листа 0,05 мм

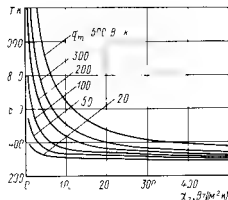


Рис 2.9 Зависимость температуры магнитного провода от условий теплообмена на поверхности корпуса ТА и удельных потерь в материале магнитопровода

предельно допустимой температуры на поверхности матрицы ТА и требуемой температуры нагрева матрицы. Кроме того, могут быть наложены ограничения на величину градиента температуры в матрице ТА. В этих условиях выигрыш во времени нагрева ТА при релейном законе регулирования мощности по сравнению с ускоренным режимом нагрева невелик, поэтому для оценки величины нагрева ТА можно пользоваться зависимостями для ускоренного режима нагрева.

Для теплового графитового аккумулятора характерно наличие магнитопроводов, защищающих корпус ТА от нагрева индукционными токами, в которых во время работы индукционного нагревателя выделяется тепло. Магнитопроводы располагаются на малых расстояниях от индуктора из-за жестких требований к массогабаритным показателям ТА, масса магнитопроводов ограничена по той же причине. Температура магнитопроводов ограничивается термостойкостью материала межлистовой изоляции (обычно 423–473 К) или температурой точки Кюри магнитопроводящего материала.

Эти обстоятельства, а также условия теплообмена на поверхности корпуса ТА могут ограничить величину мощности подводимой к индуктору ТА.

Количество теплоты Q_m выделяемой в магнитопроводах, можно определить по выражению $Q_m = k_{мп} [L_{мп} q_m] / (4,44 B f n)$, где $k_{мп}$ — коэффициент, зависящий от соотношения длин и диаметров магнитопроводов и индуктора ($k_{мп} = 0,6 \dots 0,9$ при соотношениях, характерных для ТА); $L_{мп}$ — напряжение на индукторе, В; $L_{мп}$ — длина магнитопровода м; $q_m = k_2 k_3 \rho_{мп} q_m$ — объемная плотность источников теплоты в маг

ниптопроводах, Вт м⁻³, $k_3 = 0,85 \pm 0,95$ коэффициент заполнения пакета магнитопровода магнитопроводящим материалом, учитывающий межлистовую изоляцию, $k_4 = 1,1 \pm 2$ коэффициент дополнительных потерь, обусловленных неоднородностью поля и дефектами изготовления, q_m — удельные потери в магнитопроводящем материале, зависящие от частоты тока, индукции магнитного поля, толщины листа и сорта магнитопроводящего материала, Вт кг (рис 2.8); $\rho_{мп}$ — плотность магнитопроводящего материала, кг м⁻³; f — частота тока Гц; B — магнитная индукция, Тл; n — количество витков индуктора.

Температуру магнитопроводов в установившемся режиме можно определить из баланса тепловых потоков в системе магнитопровод — корпус ТА

$$\begin{cases} a_1 (T_c - T) - \frac{\lambda_{мп}}{\delta_{мп}} (T_1 - T_2) - \frac{\delta_{мп}}{2} q_v \\ a_2 (T_1 - T_{c2}) - \frac{\lambda_k}{\delta_k} (T_2 - T) - \frac{\lambda_{мп}}{\delta_{мп}} (T - T_2) + \frac{\delta_{мп}}{2} q_v \end{cases}$$

где $\delta_{мп}$, $\lambda_{мп}$, δ_k , λ_k — толщина и коэффициент теплопроводности материала магнитопровода и корпуса ТА соответственно; T_{c1} , a_1 , T_{c2} , a_2 — температура окружающей среды и коэффициенты теплоотдачи внутри и снаружи корпуса ТА соответственно; T_1 , T_2 , T — температуры на внутренней и внешней поверхности магнитопровода на внутренней и внешней поверхности корпуса ТА соответственно.

На рис 2.9 приведены результаты определения температуры пакета магнитопровода при $\delta_{мп} = 0,01$ м, $\delta_k = 0,01$ м, $\lambda_{мп} = 13,5$ Вт (м·К), $\lambda_k = 30$ Вт (м·К), $a_1 = 5$ Вт/(м²·К), $T_{c1} = 315$ К, $T_{c2} = 293$ К. Из них следует, что условия теплообмена на поверхности корпуса ТА в период нагрева матрицы ТА в значительной мере влияют на величину допустимых удельных потерь в материале магнитопровода.

Используя известные зависимости, можно представить величину необходимого сечения магнитопровода, м² следующим выражением

$$S_{м1} = \frac{k_m \sqrt{P_n}}{4,44 B_{д} f k_3 \sqrt{\cos \varphi}}$$

где τ — эквивалентное пол. сопротивление индуктора, Ом; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности индуктора, P_n — активная мощность индуктора, Вт.

Из этого выражения можно определить величину допустимой активной мощности индуктора Вт удовлетворяющей нормальным условиям работы магнитопроводов,

$$P_{дм} = \frac{\cos \varphi}{(4,44 B_{д} f S_{мп} \frac{k_3}{k_{мп}})}$$

где $B_{д}$ — допустимое значение магнитной индукции Тл, которое ограничивается величиной магнитной индукции насыщения магнитопроводящего материала или величиной допустимых потерь в материале магнитопровода. В последнем случае допустимая магнитная индукция определяется из зависимости величины удельных потерь в материале магнитопровода от амплитуды магнитной индукции (см. рис 2.8) по значению величины допустимых удельных потерь. Допустимые удельные потери определяются из результатов расчета температуры магнитопровода (см. рис. 2.9) по заданным условиям теплообмена на поверхности корпуса теплового аккумулятора. Значения z и $\cos \varphi$ определяются из электрического расчета индуктора. Сечение магнитопровода задается из условия обеспечения приемлемых массогабаритных показателей модуля с ТА. Частота тока зависит от размеров матрицы ТА, свойств материала матрицы и вида режима нагрева.

Для режима с постоянной во времени удельной мощностью рекомендуется следующее соотношение $3 \cdot 10^6 \rho_2 / (d_m^2 \mu_2) < f < 6 \cdot 10^6 \rho_2 / (d_m^2 \mu_2)$, где d_m — диаметр матрицы ТА, ρ_2 — удельное электрическое сопротивление материала матрицы, Ом м; μ_2 — относительная магнитная проницаемость материала матрицы. Из определенного интервала частоты тока выбирается стандартное значение.

В случае применения ускоренного режима нагрева или нагрева с релейным законом изменения величины удельной мощности частота тока определяется в зависимости от конкретных требований к виду температурного поля в любой момент нагрева, требуемой скорости нагрева, конструктивных особенностей и ограничениях и других факторов. Обычно она в несколько раз выше чем при нагреве с постоянной во времени удельной мощностью.

Величину активной мощности индуктора может ограничивать также значение допустимой разности температур на поверхности и в центре матрицы ТА, определяемое из условия обеспечения прочности матрицы при циклическом воздействии температурных напряжении. Величина допустимой разности температур на поверхности и в центре матрицы зависит от свойств материала матрицы, ее геометрических параметров и определяется для каждого конкретного случая отдельно.

Мощность, передаваемую в матрицу и допустимую из условия обеспечения прочности матрицы можно определить из решения системы уравнений вида

$$\begin{cases} T_{\Pi} = \frac{P_{\Pi}}{\pi \lambda L_M} [Fo + s_1(a \ 1 \ Fo)] \\ T_{Ц} = T_{\Pi} - \Delta T_{Ц} = \frac{P_{\Pi}}{\pi \lambda L_M} [Fo + s_1(a \ 0 \ Fo)] \end{cases}$$

где L_M — длина матрицы, м; λ — коэффициент теплопроводности материала матрицы, Вт/(м·К); T_{Π} , $T_{Ц}$ — температуры на поверхности и в центре матрицы, К; P_{Π} — мощность, передаваемая в матрицу, Вт; $Fo = \frac{4dt_{\Pi}}{d_M^2}$ — критерий Фурье, $a = \frac{\xi}{d_M}$ — коэффициент температуропроводности материала матрицы м²·с; t_{Π} — время нагрева матрицы с $s_1(a \ 1 \ Fo)$ и $s_1(a \ 0 \ Fo)$ — функции специального вида $a = 1 - 2 \frac{\xi}{d_M}$

относительная глубина активного слоя, $\xi = \Delta$ при $\Delta \leq 0,2 d_M$ и $\xi = 0,2 d_M$ при $\Delta > 0,2 d_M$ ($\Delta = 503 \sqrt{\rho_2 i f}$ — глубина проникновения тока в материал матрицы)

Приведенная система уравнений является аналитическим решением уравнения теплопроводности для изолированного цилиндра с неравномерно распределенными источниками теплоты при постоянных свойствах материала матрицы.

Допустимая из условия прочности активная мощность индуктора и мощность, передаваемая в матрицу, Вт, связаны соотношением $P_{\Pi} = P_d \eta_e \eta_T$, где η_e — электрический КПД индуктора, определяемый из его электрического расчета; η_T — тепловой КПД учитывающий потери теплоты в окружающую среду.

Важной характеристикой теплового графитового аккумулятора является время нагрева матрицы. Для режима с постоянной во времени удельной мощностью оно может быть определено из записанной выше системы уравнений, если вместо $\Delta T_{Ц}$ подставить значение требуемой разности температур на поверхности и в центре матрицы. Обычно для процессов нагрева матриц ТА число $Fo > 0,2$. В этом случае для определения времени нагрева матрицы можно использовать выражение

$$t_{\Pi} = \frac{d_M^2}{4a} \frac{s(a \ 1) - (T_{\Pi}, T_{Ц}) s_1(a \ 0)}{(T_{\Pi}/T_{Ц}) - 1}$$

$$\text{где } s_1(a \ 1) \approx \frac{a^2}{8} \quad s_1(a \ 0) \approx \frac{a^2}{8} + \frac{a^2 \ln a}{2(1 - a^2)}$$

При ускоренном режиме время нагрева складывается из времени нагрева при постоянной повышенной удельной мощности и времени нагрева

при постоянной, равной заданной, температуре поверхности матрицы ГА $t_{\Pi} = t_{\Pi 1} + t_{\Pi 2}$. Первая составляющая определяется из системы уравнений. Вторую составляющую можно определить приближенно. Пренебрегая потерями теплоты в окружающую среду в процессе нагрева ГА, можно записать

$$\begin{aligned} & \Delta t [Fo + s_3(m \ 1 \ Fo + Fo_2) - s_3(m \ 1 \ Fo_2)] + \\ & + \left[1 - \frac{\Delta T_T}{2(T_{\Pi} - T_{\text{нач}})} K_{I1} Fo_1 \right] \left[1 + \frac{s_3(m \ 1 \ Fo_2)}{Fo_2} \right] = 1 \end{aligned}$$

где Fo_1 — критерий Фурье для первого этапа нагрева, $K_{I1} = \frac{P_{\Pi 1}}{[\pi L_M \lambda (T_{\Pi} - T_{\text{нач}})]}$ — критерий Кирпичева для первого этапа нагрева, $T_{\text{нач}}$ — начальная температура матрицы ГА, Fo_2 — критерий Фурье для второго этапа нагрева.

Тогда время нагрева при постоянной температуре поверхности матриц ТА определится из выражения $t_{\Pi 2} = Fo_2 d_M^2 / (4a)$.

Анализ результатов расчета показывает, что для нагрева матриц тепловых графитовых аккумуляторов с полезной емкостью 450–3000 кВт·ч целесообразно применять ток повышенной частоты равной 500–1000 Гц, так как при более низких частотах время нагрева значительно возрастает из-за ограничения по величине допустимой из условия нормальной работы магнитопроводов активной мощности индуктора. Время нагрева ТА указанного диапазона емкости составляет 6–16 ч, что составляет 10–30 % автономности технических средств. Уровни мощности необходимых источников энергии позволяют использовать оборудование, выпускаемое серийно.

В настоящее время в качестве источников энергии индукционных нагревательных установок используются электромашины преобразователи марок ОПЧ (мощность 250, 320 и 500 кВт при частотах тока 1600, 2400, 4000 Гц и напряжениях средней частоты 800/1600 В, 2500 В при частоте тока 1000 Гц и напряжениях средней частоты 1000 В), ВПЧ (мощность 12, 20, 30, 50 и 100 кВт при частотах тока 2400 и 8000 Гц и напряжениях средней частоты 800/400, 200 В), ВЭП (мощность 60 и 100 кВт при частотах тока 2400 и 8000 Гц); тиристорные преобразователи марок ТПЧ (мощность 160, 250, 500, 630 и 800 кВт при частотах 500–4000 Гц и напряжениях средней частоты 800/400 В), СЧГ (мощность 2х800 кВт при частоте тока 1000 Гц), а также ряд других преобразователей меньшей мощности. Преобразователи можно подключать параллельно, получая при этом требуемое значение мощности.

Приведенный выше метод определения времени нагрева ТА является приближенным в силу принимаемых допущений и дает лишь ориентировочные его значения. Более точное определение времени нагрева ТА требует использования математической модели процесса нагрева, учитывающей ряд его особенностей, характерных для реальных ТА.

нейность и неоднородность свойств материалов ТА, неравномерность распределения источников теплоты как в радиальном, так и в осевых направлениях, потери теплоты в окружающую среду во время процесса нагрева и др.

Такая математическая модель может быть реализована на базе обобщенного численно-аналитического решения системы двух дифференциальных уравнений: уравнения, описывающего электропитание поте и полученного из системы уравнений Максвелла, и нелинейного уравнения теплопроводности

$$\begin{cases} \operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu_2} \operatorname{rot} A\right) - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{\rho_2} E_{CT} \\ c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + qV \end{cases}$$

и векторный потенциал электромагнитного поля; c, ρ, λ – удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности ТА – напряженность электрического поля сторонних источников.

Приближенное аналитическое решение первого из этих уравнений в умственной постановке позволяет получить закон распределения удельной объемной мощности источников теплоты по объему цилиндрической матрицы ТА, который используется при решении уравнения теплопроводности. Нелинейное нестационарное двумерное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах решается численно методом конечных разностей по невязкам локально-одномерной схеме для неограниченного ортогонального цилиндра.

Использование такой математической модели процесса нагрева ТА позволяет определить время нагрева ТА, вид его температурного поля, момент нагрева, величину потерь теплоты в окружающую среду и ряд других параметров.

2.5. Оценка времени остывания теплового аккумулятора при отсутствии нагрузки

Использование ТА в составе автономного источника энергии может возникнуть ситуация, когда он полностью заряжен, а ЭУ определенное время не работает. Необходимо сравнить альтернативные решения: ждать тепловой аккумулятор вновь или, оценив количество оставшейся энергии, продолжать работать на частичной мощности или на полной при уменьшенной автономности.

Оценка энергоемкости ТА в процессе остывания без нагрузки может быть выполнена с использованием приведенной выше математической

модели определения эффективности ТА. Расход газа через матрицу и теплоизоляция в этом случае принимаются равными нулю. Теплота, запасенная матрицей, теряется только в окружающую среду. Продолжительность остывания матрицы в заданном диапазоне температур определяется как отношение энергии, запасенной в матрице, к тепловому потоку в окружающую среду.

Сравнение шести ранее рассмотренных типов теплоизоляции показало, что максимальное время остывания обеспечивает многослойная теплоизоляция (пирогرافит – графитовый войлок – циркониевый войлок). Применение теплоизоляции без пирогرافита снижает время остывания на 25 %. Решение задачи определения времени остывания ТА при отсутствии нагрузки позволяет получить необходимую для эксплуатационников информацию о величине полезной энергоемкости, оставшейся после известного времени остывания аккумулятора без нагрузки.

Оценка влияния мощности и автономности на изменение энергоемкости ТА в процессе остывания выполнена для аккумуляторов установок полезной мощностью $N_n = 30, 75, 150$ кВт и автономностью $\tau = 15, 50, 100$ ч. Рассмотрен лучший тип теплоизоляции (пирогرافит – графитовый войлок – циркониевый войлок). Параметры ТА – оптимальные. Полученные результаты представлены в обобщенном виде $(\bar{N}) - f(\bar{\tau})$; $\bar{N} = f(\bar{\tau}, \bar{P})$, где $(\bar{N}) = N_K \tau_K / (N_n \tau)$; $\bar{\tau} = t/\tau$, $\bar{N} = N_K/N_n$, $\bar{\tau} = \tau_K/\tau$. В приведенных зависимостях $(\bar{N})$ – относительная оставшаяся энергоемкость, $\bar{\tau}$ – относительное время остывания; $\bar{N}$ – относительная мощность установки; $\bar{\tau}$ – относительная автономность, N_K – оставшаяся мощность установки, τ_K – оставшаяся автономность, t – время остывания.

Как следует из полученных результатов (рис. 2.10), время полного остывания ТА без нагрузки в 5–10 раз превышает расчетную автономность. Так, относительное время остывания ТА ЭУ мощностью 150 кВт уменьшается от 10 до 6 при росте автономности от 15 до 100 ч. Время остывания такого ТА без нагрузки составит 150–600 ч в зависимости от автономности. Снижение мощности от 150 до 30 кВт уменьшает относительное время остывания с 10 до 6 при автономности 15 ч и с 6 до 4,5 при автономности 100 ч. Таким образом, время остывания ТА ЭУ мощностью 30 кВт составляет примерно 80–450 ч в зависимости от автономности. Относительная энергоемкость ТА ЭУ, не работавшей промежуток времени, равный автономности ($\bar{\tau} = 1$), составляет 0,65–0,45, причем меньшее значение соответствует большей начальной энергоемкости.

Полученные результаты указывают на достаточно высокую способность ТА сохранять работоспособность в процессе непредвиденных задержек приводящих к остыванию без нагрузки. Взаимосвязь относительных оставшихся мощности и автономности в функции относительного времени остывания позволяет целесообразно использовать энер-

нелинейность и неоднородность свойств материалов ГА, неравномерность распределения источников теплоты как в радиальном, так и в осевом направлениях, потери теплоты в окружающую среду во время процесса нагрева и др.

Такая математическая модель может быть реализована на базе комбинированного численно-аналитического решения системы двух дифференциальных уравнений, уравнения, описывающего электромагнитное поле и полученного из системы уравнения Максвелла, и нестационарного нелинейного уравнения теплопроводности

$$\begin{cases} \operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu_2} \operatorname{rot} A\right) - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{\rho_2} E_{\text{ст}} \\ c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_V \end{cases}$$

где A — векторный потенциал электромагнитного поля, c, ρ, λ — удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности ГА, $E_{\text{ст}}$ — напряженность электрического поля сторонних источников.

Приближенное аналитическое решение первого из этих уравнений в двумерной постановке позволяет получить закон распределения удельной объемной мощности источников теплоты по объему цилиндрической матрицы ГА, который используется при решении уравнения теплопроводности. Нелинейное нестационарное двумерное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах решается численно методом конечных разностей по неявной локально-одномерной схеме для неограниченного ортогонального цилиндра.

Использование такой математической модели процесса нагрева ГА позволяет определить время нагрева ГА, вид его температурного поля в любой момент нагрева, величину потерь теплоты в окружающую среду и ряд других параметров

2.5. Оценка времени остывания теплового аккумулятора при отсутствии нагрузки

При использовании ГА в составе автономного источника энергии может возникнуть ситуация, когда он полностью заряжен, а ЭУ определенное время не работает. Необходимо сравнить альтернативные решения: заряжать тепловой аккумулятор вновь или, оценив количество оставшейся энергии, продолжать работать на частичной мощности или на полной при уменьшенной автономности.

Оценка энергоемкости ГА в процессе остывания без нагрузки может быть выполнена с использованием приведенной выше математической

модели определения эффективности ГА. Расход газа через магистраль и теплоизоляция в этом случае принимаются равным нулю. Теплогаз, запасенный матрицей, теряется только в окружающую среду. Продолжительность остывания матрицы в заданном диапазоне температур определяется как отношение энергии, запасенной в матрице, к тепловому потоку в окружающую среду.

Сравнение шести ранее рассмотренных типов теплоизоляции показало, что максимальное время остывания обеспечивает многослойная теплоизоляция (пирографит — графитовый войлок — циркониевый войлок). Применение теплоизоляции без пирографита снижает время остывания на 25 %. Решение задачи определения времени остывания ГА при отсутствии нагрузки позволяет получить необходимую для эксплуатационников информацию о величине полезной энергоемкости, оставшейся после известного времени остывания аккумулятора без нагрузки.

Оценка влияния мощности и автономности на изменение энергоемкости ГА в процессе остывания выполнена для аккумуляторов установок полезной мощностью N_n 30, 75, 150 кВт и автономностью $\tau - 15, 50, 100$ ч. Рассмотрен лучший тип теплоизоляции (пирографит — графитовый войлок — циркониевый войлок). Параметры ГА оптимальные. Полученные результаты представлены в обобщенном виде $(\bar{N}_k) - f(\bar{\tau})$, $\bar{N}_k = f(\bar{\tau}, \bar{t})$, где $(\bar{N}_k) - N_k / (N_n \tau)$; $\bar{\tau} = t / \tau$, $\bar{N} = N_k / N_n$; $\bar{t} = t_{\text{ост}} / \tau$. В приведенных зависимостях $(\bar{N}_k)$ — относительная оставшаяся энергоемкость, $\bar{\tau}$ — относительное время остывания, $\bar{N}$ — относительная мощность установки; $\bar{t}$ — относительная автономность; N_k — оставшаяся мощность установки, $t_{\text{ост}}$ — оставшаяся автономность, t — время остывания.

Как следует из полученных результатов (рис. 2.10), время полного остывания ГА без нагрузки в 5–10 раз превышает расчетную автономность. Так, относительное время остывания ГА ЭУ мощностью 150 кВт уменьшится от 10 до 6 при росте автономности от 15 до 100 ч. Время остывания такого ГА без нагрузки составит 150–600 ч в зависимости от автономности. Снижение мощности от 150 до 30 кВт уменьшает относительное время остывания с 10 до 6 при автономности 15 ч и с 6 до 4,5 при автономности 100 ч. Таким образом, время остывания ГА ЭУ мощностью 30 кВт составляет примерно 80–450 ч в зависимости от автономности. Относительная энергоемкость ГА ЭУ, не работавшей промежуток времени, равный автономности ($\bar{\tau} = 1$), составляет 0,65–0,45, причем меньшее значение соответствует большей начальной энергоемкости.

Полученные результаты указывают на достаточно высокую способность ГА сохранять работоспособность в процессе непредвиденных задержек, приводящих к остыванию без нагрузки. Взаимосвязь относительных оставшихся мощности и автономности в функции относительного времени остывания позволяет целесообразно использовать энер-

3.1 Газотурбинные преобразователи

Наличие ТА в качестве источника энергии бестопливных ЭУ делает необходимым применение таких преобразователей, рабочий процесс которых отвечает как условиям внешнего подвода теплоты, так и высокой эффективности реального термодинамического цикла. Указанным условиям удовлетворяет газотурбинный агрегат закрытого цикла с регенерацией. Паротурбинные и паромашинные преобразователи, рабочий процесс которых осуществляется с низкой эффективностью, не имеющие перспектив существенного повышения КПД, далее не рассматриваются.

Установка с тепловым графитовым аккумулятором для автономного источника электрической энергии предполагает наличие замкнутого контура, который обеспечивает передачу теплоты от ТА газовому теплоносителю и последующее преобразование тепловой энергии газового потока в механическую в газотурбинном агрегате (рис. 3.1). Успехи в области создания газотурбинных агрегатов закрытого цикла малой мощности (10–160 кВт) в смежных областях техники позволяют использовать этот опыт и имеющиеся рекомендации для разработки установок применительно к техническим средствам освоения океана.

Наиболее приемлемым следует считать одновальными газотурбинный агрегат, имеющий в своем составе центробежный компрессор, радиально-осевую турбину, регенератор и охладитель. Конструктивно компрессор, турбина и электрогенератор образуют единый блок (рис. 3.2 и 3.3). В качестве рабочего вещества замкнутого контура применяют гелий-ксеноновую смесь, которая имеет большой коэффициент теплопроводности, что позволяет получать небольшие массы и габариты теплообменных аппаратов. Молекулярная масса гелий-ксеноновой смеси находится в результате оптимизации параметров всей установки (см. гл. 4) и для рассматриваемого

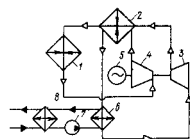


Рис. 3.1 Принципиальная схема газотурбинной установки с тепловым графитовым аккумулятором

1 — тепловой аккумулятор, 2 — регенератор, 3 — компрессор, 4 — турбина, 5 — электрогенератор, 6 — охладитель, 7 — циркуляционный насос, 8 — концевой охладитель

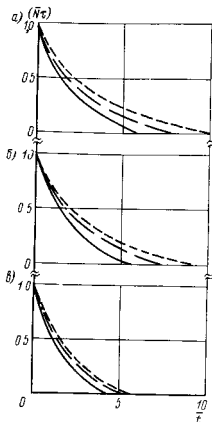


Рис. 2.10 Зависимости $(N_p) - f(t)$ (теплоизоляция пирографит графитовый войлок — штриховый войлок) а — $\tau = 15$ ч; б — $\tau = 50$ ч; в — $\tau = 100$ ч
— $N_p = 30$ кВт; $N_p = 75$ кВт,
— $N_p = 150$ кВт

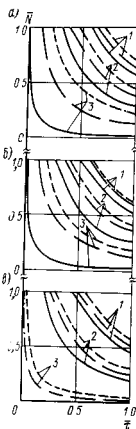


Рис. 2.11 Зависимости $V - f(t)$ (теплоизоляция пирографит графитовый войлок — штриховый войлок) а — $\tau = 15$ ч; б — $\tau = 50$ ч; в — $\tau = 100$ ч
1 — $V = 1.5$; 2 — $V = 2.5$,
3 — $V = 3.5$. — $N_p = 30$ кВт,
— $N_p = 75$ кВт,
— $N_p = 150$ кВт

гую ТА (рис. 2.11). Так, ЭУ мощностью 30–150 кВт, не работавшая в течение 15–100 ч, может вырабатывать полную мощность в течение 10–45 ч либо мощность 22–68 кВт в течение 15–100 ч. Полученные зависимости могут быть использованы при разработке стратегии эксплуатации установки в рассмотренном выше аспекте.

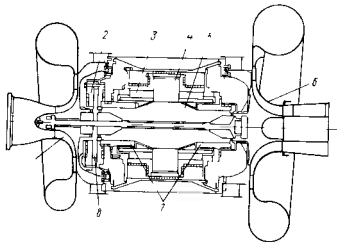


Рис. 3.2 Турбокомпрессор с генератором автономного источника энергии

1 - компрессор, 2 - упорный подшипник, 3 - обмотка, 4 - пластины, 5 - ротор электрогенератора, 6 - турбина, 7 - опорные подшипники, 8 - крышка упорного подшипника

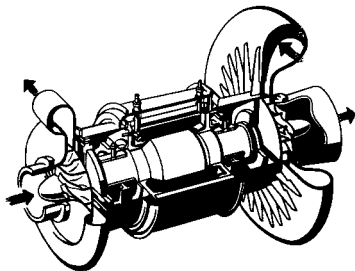


Рис. 3.3 Турбокомпрессор с генератором автономного источника энергии (общий вид)

типа установки лежит в пределах 75–85. Использование смеси нейтральных газов благоприятно и с точки зрения совместимости теплоносителя с конструкционными материалами, повышает надежность узлов и установки в целом. Наличие замкнутого контура позволяет обеспечивать оптимальные размеры проточных частей компрессора и турбины путем выбора соответствующей величины давления газа перед компрессором, осуществлять регулирование мощности установки изменением начального давления.

Начальная температура перед турбиной лежит в пределах 1150–1200 К, оптимальная степень повышения давления газа в компрессоре 1,8–2,1, степень регенерации благодаря замкнутому контуру и малым мощностям установки достигает 0,92–0,96. Вследствие низкой температуры заборной воды температура гелий-ксеноновой смеси перед компрессором может поддерживаться около 287 К.

В настоящее время эффективность центробежного компрессора и радиально-осевой турбины подобных установок достаточно высока. Так, КПД центробежного компрессора по заторможенным параметрам в зависимости от размеров составляет 0,82–0,86, КПД турбины 0,87–0,9. Все это позволяет получить весьма высокую эффективность газотурбинного цикла, КПД которого достигает 0,4 и более.

Конструктивные особенности блока турбокомпрессор-генератора. Двухопорный ротор, консольное расположение компрессора и турбины, применение опор с газовой смазкой. Ротор опирается на подшипники с самоустанавливающимися сегментами, которые расположены по обе стороны от генератора. Упорный подшипник с самоустанавливающимися сегментами расположен со стороны компрессора. Применение газовой смазки обеспечивает минимальные потери в опорах, исключает загрязнение рабочего вещества.

Для обеспечения надежной работы подшипниковых узлов предусмотрено их охлаждение, которое осуществляется потоком рабочего вещества протекающим через центральное отверстие. Упорный подшипник охлаждается при помощи жидкостного теплообменника, который установлен на подшипнике. Предусмотрен ряд конструктивных мероприятий для уравнивания осевого усилия от компрессора и турбины, для предотвращения протечек газа из областей турбины и компрессора с высоким давлением в полости подшипников и др.

Многолетний опыт работы по созданию различных конструкций газотурбинных преобразователей дает основание для выбора наиболее приемлемого типа турбокомпрессор-генератора и его параметров. В первую очередь речь идет о значении частоты вращения ротора. С увеличением частоты вращения уменьшаются размеры компрессора, турбины и ротора генератора, что приводит к снижению массы преобразователя. Однако при этом растут напряжения, уменьшаются запасы прочности, снижается надежность. Наилучшим является вариант турбокомпрессор-генератора с частотой вращения 24 тыс. об/мин. Для диа-

пазона мощности генератора 50–150 кВт масса турбокомпрессора генератора лежит в пределах 200–300 кг

Характерной особенностью рассматриваемых блоков является применение моторного запуска турбокомпрессора-генератора, что оказывается возможным благодаря работе генератора в режиме двигателя от постороннего источника переменного тока. Ротор разгоняется до самоподдерживающейся частоты вращения, после чего вследствие развиваемого турбиной крутящего момента ротор выходит на расчетную частоту вращения. Время запуска зависит от температуры перед турбиной (перед зарядителем регенератор прогревается). Так, время выхода на холостой ход ориентировочно составляет 20–30 с, а время выхода на номинальную частоту — 75–200 с. Меньшие значения этих величин соответствуют большим температурам газа перед турбиной.

Регулирование мощности таких установок возможно следующими способами: изменением максимальной температуры цикла, изменением расхода рабочего вещества, применением паразитной нагрузки. Первый способ основан на изменении соотношений расходов рабочего вещества в патрубках подвода к ТА и обеспечения требуемой температуры в камере смешения. Уменьшение температуры рабочего вещества для обеспечения долевых режимов ведет к снижению КПД цикла. Второй способ наиболее экономичный, так как позволяет сохранить максимальную температуру рабочего вещества оптимальной. Изменение расхода обеспечивается соответствующим изменением давления в замкнутом контуре. Указанные способы регулирования мощности возможны и в целом сообразны при длительных долевых режимах.

Если автономный источник энергии обеспечивает работу потребителей в широком диапазоне изменения нагрузок при малых временных интервалах, то целесообразно использовать паразитную нагрузку, на которую сбрасывается лишняя мощность. Эта нагрузка представляет собой водяной реостат и в конструктивном отношении является наиболее простым способом регулирования мощности.

Как видно, газотурбинные преобразователи замкнутого цикла обладают определенными достоинствами, имеют высокий КПД, хорошо сочетаются с источником энергии — тепловым графитовым аккумулятором, допускают применение унифицированного блока турбокомпрессора-генератора для широкого диапазона мощности (30–150 кВт). Это позволяет рассматривать газотурбинный преобразователь как перспективный тип преобразователя в ЭУ с тепловым графитовым аккумулятором для различных транспортных средств.

3.2 Двигатели Стирлинга

Повышенный интерес проектантов и исследователей автономных источников энергии к ДС, наблюдаемый в последнее время, обусловлен особенностями его рабочего процесса конструктивным исполнением

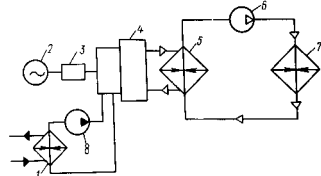


Рис. 3.4 Принципиальная схема установки с двигателем Стирлинга и тепловым графитовым аккумулятором

1 — коцевой охладитель, 2 — электрогенератор, 3 — мультипликатор, 4 — двигатель Стирлинга, 5 — нагреватель, 6 — аккумулятор, 7 — тепловой графитовый аккумулятор, 8 — насос

эксплуатационными качествами. К числу основных преимуществ ДС как преобразователя тепловой энергии следует отнести достаточно высокий КПД, низкий уровень шума, нечувствительность к перегрузкам, достаточно высокую равномерность крутящего момента, возможность работы в сочетании с различными источниками энергии.

Двигатель работает по замкнутому циклу его термодинамический цикл включает изотермическое сжатие с отводом теплоты, подвод теплоты при постоянном объеме, изотермическое расширение с подводом теплоты и отвод теплоты при постоянном объеме. Характерной для цикла Стирлинга является регенерация теплоты. При полной регенерации КПД цикла Стирлинга равен КПД цикла Карно. Рабочим веществом замкнутого контура принципиально может быть любой газ, однако наиболее эффективными являются водород и гелий. Давление газа во внутреннем контуре 10–30 МПа. ДС представляет собой двигатель с внешним подводом теплоты, что дает возможность применять различные источники энергии. Именно это обстоятельство позволяет использовать ДС для создания ЭУ без топлива с ТА. На рис. 3.4 представлена схема ЭУ с ДС и тепловым графитовым аккумулятором.

Принципиально в таких установках может использоваться любой тип ДС (двигатель вытесняющего типа — рядный с ромбической передачей, V-образный с крещцовым механизмом; двигатель двойного действия — рядный с крещцовым механизмом, с барабанным расположением цилиндров и косой лямбой). Если автономный источник энергии выполняется в виде энергетического модуля (ЭМ), то наиболее приемлемым является двигатель с косой шайбой (рис. 3.5) [35]. Такой двигатель имеет малые габариты, наиболее простой приводной

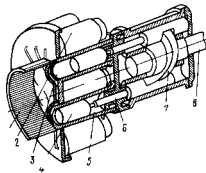


Рис. 3.5 Схема двигателя Стирлинга двойного действия с косой шайбой

механизм, цилиндрическую форму, что является основным преимуществом, хорошо komponуется с тепловым графитовым аккумулятором. Однако этот тип двигателя еще недостаточно освоен. При этом требуется определенная адаптация ДС к условиям совместной работы с графитовым аккумулятором. Это относится в первую очередь к проектированию нагревателя, который работает в другом температурном режиме по сравнению с использованием жидкого топлива в качестве источника энергии.

Грубки нагревательной головки, которая в этом типе двигателя является общей для всех цилиндров, омывается потоком гелий-ксеноновой смеси, которая циркулирует через IА во внешнем контуре. Температура газовой смеси на входе в нагревательную головку лежит в пределах 1000–1070 К и определяется в результате оптимизации параметров энергетического модуля в целом (см. гл. 5). Размеры нагревательной головки возрастают по сравнению с традиционными решениями (при работе на жидком топливе).

Эффективный КПД зависит от величин термического и механического КПД, внутренних потерь. Для отношения температур $T_3/T_1 = 2,5 \div 3,5$ термический КПД лежит в пределах 0,43–0,51. Механический КПД может быть оценен величиной 0,93–0,95. Это позволяет ориентироваться на достаточно высокую эффективность ДС. Анализ массогабаритных показателей ДС показывает, что их удельная масса лежит в пределах 3–1,2 кг/кВт для диапазона мощностей 50–1200 кВт. Совершенствование конструкции, улучшение технологии должны привести к дальнейшему уменьшению этих удельных показателей.

При разработке автономного источника электрической энергии на базе ДС и теплового графитового аккумулятора приходится решать проблему создания стирлин-генератора. Так как масса и габариты электрогенераторов, работающих с частотой вращения 15 и 3 тыс. об/мин, весьма велики для применения в энергетическом модуле, то аналогично газотурбогенератору целесообразно использовать высокооборотный электрогенератор ($n=24$ тыс. об/мин, 400 Гц). В этом случае необходим мультипликатор, который имеет достаточно малые массу и габариты. Более простое техническое решение будет при использовании ДС для работы на винт.

Регулирование мощности ДС может обеспечиваться тремя рассмотренными выше способами. При этом изменение давления осуществляется во внутреннем контуре двигателя. Общие рекомендации по применению способа регулирования, рассмотренные для ГТУ, сохраняются и для ДС. Таким образом, ДС также обладает необходимыми качествами высокоэффективного преобразователя энергии, что позволяет рассматривать его конкурентоспособным при разработке автономных источников электрической энергии.

3.3 Высокооборотные электрогенераторы

Создание автономных источников электрической энергии связано с применением высокооборотных генераторов обладающих малыми массами и габаритами при достаточно высоком КПД. Обширные исследования различных типов генераторов автономных источников энергии мощностью до 160 кВт дают возможность охарактеризовать их как эффективные преобразователи механической энергии вырабатываемой тем или иным агрегатом, в электрическую.

Генераторы автономных источников электрической энергии должны отвечать следующим требованиям.

- обеспечивать максимальную длительную выходную мощность при трехфазной нагрузке и коэффициенте мощности 0,75 и выдерживать перегрузку при коэффициенте мощности 0,9 через 5 с после установления стационарного теплового режима.
- обеспечивать возможность работы при 120 % номинальной скорости вращения без выхода из строя при всех нагрузках в течение ограниченного времени.
- выдерживать короткое замыкание в течение не менее 5 с, вентиляционные потери не должны превышать 6 % выходной мощности генератора.
- предполагаемые значения ускорения должны составлять 1,5 g во взаимно перпендикулярных направлениях;
- обеспечивать возможность работы в любом положении
- регулировка частоты должна осуществляться с точностью ± 1 % номинального значения при изменениях выходной мощности от 10 % до номинальной.

конструкция статора должна допускать включение обмоток на напряжения 120, 240 и 480 В между фазами и нейтралью.

Выполненные исследования по отбору генераторов (индукторный и генератор Ланделла) в широком диапазоне изменения частот вращения (24 000 и 36 000 об/мин), частоты тока (400–2400 Гц), конструктивных особенностей (2- и 6-полюсные, с числом пазов 30–84) показали, что лучшей и практически является конструкция двухполюсного генератора Ланделла с частотой вращения 24 000 об/мин и частотой тока 400 Гц.

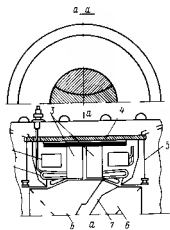


Рис 3.6 Двухполюсный электрогенератор Ланделла

1 обмотка цепи переменного тока, 2 обмотка возбуждения, 3 магнитное железо статора, 4 магнитное ярмо статора, 5 крышки, 6 магнитные элементы ротора, 7 немагнитные элементы ротора

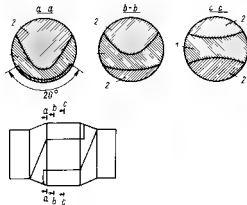


Рис 3.7 Ротор двухполюсного генератора Ланделла

1 немагнитная сталь, 2 магнитная сталь. Важным преимуществом данного генератора является то, что его ротор можно сконструировать с гладкой наружной поверхностью, что дает возможность получить высокие КПД генератора

На рис. 3.6 и 3.7 показаны двухполюсный генератор Ланделла и его ротор. Двухполюсный ротор генератора Ланделла состоит из двух магнитных полюсных секций, заделанных одним концом в кольцевые магнитные проводы, расположенные на каждом из торцов бочки ротора. Для уменьшения вентиляционных потерь зазор между магнитными полюсными секциями заполнен немагнитным сплавом. Этот материал спекается с материалом магнитных секций для обеспечения однородности структуры ротора с целью уменьшения напряжений в роторе и для выравнивания его поверхности. Катушка стационарного поля располагается над свесами концов обмотки переменного тока. Размеры катушек возбуждения могут быть увеличены для уменьшения потерь и величины тока потребляемого от возбуждателя регулятора напряжения.

Конструкция генератора с 60 пазами рассчитана на напряжение 240 В между фазой и нейтралью, однако обмотки генератора могут быть переключены для получения напряжения 480 В между фазой и нейтралью. Переключение осуществляется последовательным соединением двух параллельных ветвей обмотки. Поскольку минимальное число витков в пазу статора равно 2 и максимальное число параллельных ветвей также равно 2, то статор с 60 пазами не может быть переключен или перемотан для получения напряжения 120 В между фазой и нейтралью. Для того

чтобы иметь возможность переключения статора или его перемоти для обеспечения напряжений 120, 240 или 480 В между фазой и нейтралью применяют конструкцию статора с 30 пазами. Для конфигурации, обеспечивающей напряжение 120 В, статор с 30 пазами наматывают двумя параллельными ветвями так, что в каждый паз укладывают два проводника. Две параллельные ветви соединяют последовательно для получения напряжения 240 В между фазой и нейтралью. Для получения напряжения 480 В между фазой и нейтралью обмотка статора должна быть перемотана так, чтобы в каждый паз было уложено по 4 проводника. Вследствие уменьшения числа пазов статора с 60 до 30 поверхностные потери в полюсах существенно возрастают, что обусловлено большими пазовым шагом и пазовым отверстием, характерными для конструкции с 30 пазами. Это приводит к росту амплитуды пульсаций магнитного потока на поверхности ротора. Конструкции генераторов с 30 и 60 пазами значительно отличаются по размерам.

Большая часть теплоты, выделяемой вследствие наличия потерь в генераторе, должна отводиться жидким охладителем, протекающим через его невращающиеся детали. Однако некоторое количество теплоты отводится через ротор, раму и посредством излучения и конвекции теплоты к окружающим генератор деталям конструкции. Теплота, обусловленная потерями в генераторе Ланделла, выделяется в обмотке возбуждения, обмотке статора, пакете статора (в зубцах и спинке), на поверхностях полюсов ротора, в зазоре между ротором и статором.

В генераторе Ланделла потери и температуры в обмотке возбуждения практически не зависят от потерь и распределения температур в остальных элементах генератора. Это происходит вследствие того, что внешняя поверхность обмотки возбуждения находится в непосредственном контакте с охлаждаемым жидкостью корпусом. Теплота, выделяющаяся вследствие потерь в пакете, обмотке статора роторе и зазоре не поступает к обмотке возбуждения.

Для уменьшения радиальных градиентов температур в катушке между слоями спиральной обмотки имеется тонкий слой изоляции, а на торцах секций обмотки прикреплена керамическая пластинка. Величины температур и потерь в обмотке статора взаимосвязаны: рост потерь приводит к увеличению температур, что ведет к дальнейшему росту потерь. Система изоляции пазов, длина лобовых частей обмотки и окружающая их среда оказывают непосредственное влияние на распределение температур в обмотке; величина температуры охладителя и пакета, а также система отвода теплоты, выделяющейся вследствие потерь на трение и вентиляцию и поверхностных потерь в полюсах, оказывают косвенное влияние.

Вследствие того что конвективный отвод теплоты и отвод излучением меньше того количества теплоты, которое выделяется на этих участках, увеличение длины лобовых частей обмотки увеличивает эту разность. Таким образом, местные максимальные температуры в лобовых частях

обмотки можно снизить, уменьшая длину лобовых частей. Теплота от расположенного в пазу проводника к зубам железа передается через жесткие или гибкие изоляционные пазовые прокладки и через заполненный газом зазор. Часть теплоты, выделяющаяся за счет потерь в полюсных наконечниках, проводниках и газе, отводится путем использования принудительного охлаждения. Принудительное охлаждение генератора обеспечивается рециркуляцией газа, заполняющего полость генератора.

Тепловой расчет двухполюсного генератора, работающего при номинальной нагрузке, показывает, что система охлаждения, использующая рециркуляцию газа, практична и вполне осуществима. Значительная часть теплоты, выделяющаяся в генераторе вследствие внутренних потерь отводится газом к холодной зоне ярма.

Особенностью работы генераторов следует считать возможность возникновения коронного разряда. Обмотка переменного тока генера-

тора находится в гелий-кислородной атмосфере. Для газов существуют зависимости, которые определяют условия возникновения коронного разряда в зависимости от напряжения, давления газа и расстояния между электродами. Градиент напряжения в газе зависит от диэлектрической постоянной и толщины изоляционных материалов между электродами. Давление газа в полости статора генератора переменного тока существует минимально допустимое давление, при котором коронный разряд еще не возникает. Применение неорганических изоляционных материалов может привести к возникновению коронного разряда при гораздо более низких напряжениях, чем применение органических изоляционных материалов. Последние, однако, более устойчивы к разрушениям, возникающим в результате появления импульсов коронного разряда. Органические изоляционные материалы могут обеспечить более длительный срок службы при работе на пониженных напряжениях. Учет возможности возникновения коронного разряда ограничивает минимальное давление в корпусе величиной 0,1 МПа при напряжении 240 В и 0,4 МПа при напряжении 480 В.

В табл. 3.1 и на рис. 3.8 приведены данные, позволяющие определить массогабаритные показатели и КПД двухполюсных генераторов Ланделла номинальной мощностью 160 кВт с частотой вращения 24 тыс. об/мин и частотой тока 400 Гц. Электрические характеристики генераторов приведены для нагрузок, соответствующих значениям 1/4, 1/2, 1 и 1,5 номинальной выходной мощности при величине коэффициента мощности 0,75. Тенденция изменений КПД для рассматриваемых конструкций дает полезную информацию о приведении конструкции в соответствие с эксплуатационными требованиями.

Так как полный КПД рассмотренных в табл. 3.1 генераторов лежит в районе 0,89, а масса их отличается менее чем на 50 кг, то для ЭМ указанных генераторов можно считать равноценными (по КПД и массе на номинальном режиме). В связи с унификацией электрогенераторов для наиболее типового диапазона мощностей 30–150 кВт вопрос о выборе конкретной конструкции следует увязывать с предполагаемым количеством ЭМ, их единичной мощностью, долей переменных режимов в процессе работы.

3.4. Способы передачи теплоты от аккумулятора к преобразователю энергии

При использовании теплового графитового аккумулятора в качестве высокотемпературного источника тепловой энергии в различных типах ЭУ возникает проблема передачи теплоты от источника (ТА) преобразо-

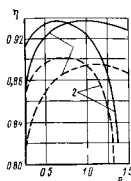


Рис. 3.8 Характеристики двухполюсного генератора Ланделла (коэффициент мощности 0,75)

1 — число пазов 60
2 — число пазов 84
электромеханический КПД — полный КПД

Таблица 3.1 Параметры 2-полюсных генераторов Ланделла мощностью 160 кВт

Параметр	Число пазов	Число пазов	Число пазов
	84	60	30
Номинальная мощность при коэффициенте мощности 0,75, кВА		214	
Напряжение, В		240 (480)	
Частота вращения об/мин		24 000	
Частота тока, Гц		400	
Размеры ротора, мм			
внутренний диаметр		204	
длина	90		
Наружный диаметр акста железа, мм	325	332	326
Масса, кг	385	412	420
обмотки статора	7,72	12,2	11,9
обмотки возбуждения	19,5	19,6	20,1
ярма	78,1	95,9	92,8
листы железа	44,5	61,5	61,9
ротора	61,4	69	65,7
суммарная	11,2	258,7	252,4
Число проводников в пазу	2	4	4
Число витков на фазу	14	10	20
Размеры проводника без изоляции, мм	2,06 x 3,66	2,06 x 3,66	4,62 x 3,15
Скорость на наружной поверхности ротора, м/с	40	25,5	
Потери мощности, Вт			
полные электромагнитные	13 060	1 158	11 985
вентиляционные	5 670	8 610	8 600
суммарные	18 730	19 768	20 585
КПД			
электромагнитный	0,925	0,932	0,930
полный	0,895	0,890	0,886

вательно В некоторых установках этот вопрос решается весьма просто как, например, в ГТУ замкнутого цикла, в которой гелий-ксеноновая смесь с помощью компрессора прокачивается через специальные каналы в ТА, обеспечивая равномерный отвод теплоты. Но уже в ДС, у которого имеются два контура (внутренний и внешний), для обеспечения передачи теплоты от аккумулятора к нагревателю приходится вводить вентиляторы, с помощью которых осуществляется циркуляция теплоносителя внешнего контура При этом на привод вентиляторов затрачивается часть полезной мощности.

Интересным является решение, основанное на применении тепловых труб для передачи теплоты от аккумулятора преобразователю. Тепловые трубы нашли широкое применение в различных областях техники, и особенно при проектировании ЭУ из-за высококоэффициентной теплопроводности этих труб (вследствие большой скрытой теплоты парообразования их теплоносителя оказывается возможным перенос значительного количества теплоты даже при небольших скоростях движения пара) и возможности трансформации тепловых потоков (зоны испарения и конденсации находятся на противоположных концах тепловой трубы). Тепловая труба позволяет преобразовывать большие тепловые потоки в зоне испарения в малые в зоне конденсации (и наоборот) за счет изменения поверхности теплоотвода Это свойство тепловой трубы имеет большое практическое значение, так как в установках с тепловым графитовым аккумулятором приходится отбирать теплоту с весьма большой поверхности и передавать компактным элементам преобразователя.

Поскольку уровень рабочих температур для преобразователей лежит в пределах 1000–1200 К (а для некоторых преобразователей и выше) то речь идет о применении высокотемпературных тепловых труб. Здесь следует обратить внимание на требования, которые предъявляются к тепловым трубам, и проблемы, с которыми приходится сталкиваться. В частности, необходимо, чтобы рабочая жидкость была совместима с материалом фитиля и корпуса, обладала высокой герметической стойкостью обеспечивала смачиваемость фитиля и материала корпуса трубы, обладала большой скрытой теплотой парообразования, высокой теплопроводностью, имела низкие значения вязкости жидкой и газообразной фаз высокое поверхностное натяжение расчетное значение точки замерзания или затвердевания.

Выбор рабочей жидкости требует привлечения также многих других критериев. Имеющиеся публикации показывают, что для высокотемпературных тепловых труб в качестве рабочей жидкости могут применяться натрий, литий, серебро, у которых рабочий диапазон температур составляет 870–1470 К, 1270–2070 К и 2070–2570 К соответственно

Важную роль играет фитиль, который обеспечивает капиллярный напор для перемещения рабочей жидкости и зоны конденсации в зону испарения распределение жидкости по всей зоне испарителя Фитиль должен легко вписываться в корпус тепловой трубы Толщина фитиля рассчитывается

К корпусу тепловой трубы, который изолирует рабочую жидкость от внешней среды, также предъявляется ряд требований. Он должен быть герметичным, прочным, обеспечивать подвод теплоты к рабочей жидкости и отвод теплоты. Материал корпуса не должен иметь пор, чтобы не было диффузии газа в тепловую трубу, его теплопроводность должна быть высокой, чтобы поддерживать наименьший перепад температур между источником теплоты и фитилем. Проблемой первостепенной важности является совместимость материала корпуса с рабочей жидкостью

Особенностью применения тепловых труб для передачи теплоты от графитового аккумулятора к преобразователю является высокая температура нагрева графитовой матрицы (3500 К), что делает необходимым размещение их в зоне тепловой изоляции. Конструктивно тепловые трубы могут выполняться сегментного типа в районе испарительного участка не могут быть и адаптированы к специфическим условиям конструкции преобразователя в районе конденсатора

3.5. Принципы компоновки теплового графитового аккумулятора и преобразователя в энергетическом модуле

Широкий класс транспортных средств, на которых могут применяться автономные источники электрической энергии, требует разработки мощностного ряда таких источников. В этом случае в зависимости от задач, стоящих перед транспортным средством, его энерговооруженность может быть различной. Это значит, что энергетическая установка заданной мощности и автономности может использоваться на транспортных средствах различного целевого назначения При наличии унифицированного мощ-

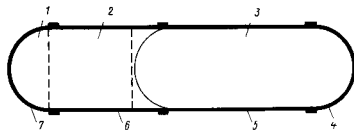


Рис 3.9 Компоновка энергетического модуля

1 отсек для конечного охладителя, насоса, баллонов, блока управления, 2 отсек для преобразователя; 3 тепловой аккумулятор. 4 задняя полусфера прочного корпуса аккумулятора; 5 цилиндрическая часть прочного корпуса аккумулятора, 6 цилиндрическая часть прочного корпуса модуля, 7 передняя полусфера прочного корпуса модуля

ностного ряда автономных источников электрической энергии проектирование транспортного средства ведется (с учетом потребной энергоемкости) при известном источнике электрической энергии. Конструктивно такой источник целесообразно разрабатывать в виде ЭМ (что отражает современную концепцию при проектировании техники применение модульного принципа), имеющего свои прочный корпус, внутри которого расположено энергетическое оборудование. Задачи такого модуля: выработка электрического тока (применительно к рассматриваемым объектам с частотой 400 Гц) обеспечение заданной мощности в течение требуемой автономности.

На рис. 3.9 представлена схема такого модуля, отражающая принцип его компоновки. С учетом того, что осевая протяженность ТА существенно больше, чем преобразователя, корпус модуля выполняется сферичесилиндрическим. Так как ТА имеет собственный ПК (см. гл. 2), то его задняя полусфера и цилиндрическая часть корпуса 5 являются одновременно и ПК энергетического модуля. В соответствии со схемой передачи теплоты от аккумулятора преобразователю (газотурбинному, ДС или любому другому) последний размещается в отсеке 2. Осевые размеры этого помещения определяются размерами преобразователя и трубопроводов для движения теплоносителя. Отсек передней полусферы используется для размещения концевой охлаждающей (на поверхности сферы) насоса, баллона и другого оборудования.

Осевые и диаметральные размеры ЭМ зависят от заданной мощности и автономности и определяются в процессе оптимизации параметров ЭМ в целом. Подробно эти вопросы рассмотрены в гл. 4, 5.

4 ПАРАМЕТРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ НА БАЗЕ ГАЗОТУРБОГЕНЕРАТОРА

4.1. Эффективность газотурбогенератора с тепловым графитовым аккумулятором и энергетических модулей

Исходные положения. Современная тенденция в разработке автономных источников электрической энергии — их модульное исполнение. Это позволяет применять одни и те же ЭМ для различных условий работы, комплектовать источник энергии из унифицированных модулей в соответствии с требуемой энергоемкостью, повышает надежность, ремонтную пригодность.

ЭМ представляет собой газотурбогенератор с ТА (графитовая матрица) размещенные в ПК. Газотурбопривод закрытого цикла рабочее

вещество гелий-кислородная смесь. Электрогенератор вырабатывает ток частотой 400 Гц. С учетом требуемой различной энергоемкости рассматриваются следующие диапазоны мощностей и автономностей $N_{\text{дп}} = 30 \div 150 \text{ кВт}$, $\tau = 15 \div 250 \text{ ч}$.

Создание ЭМ ставит проблему комплексной оптимизации параметров газотурбогенератора с учетом влияния прочного корпуса. При этом следует рассматривать как систему на верхнем иерархическом уровне ЭМ в качестве подсистем — газотурбогенератор (ГТГ) и ПК, в качестве блоков — источник энергии (ТА), турбокомпрессор, регенератор, охладитель, электрогенератор, прочее оборудование.

Решение задачи оптимизации параметров ГТГ с ТА включает разработку математической модели, позволяющей определять эффективность отдельных блоков и ЭМ в целом, формализацию целевой функции, определение оптимальных параметров для конкретных условий проектирования, анализ результатов, принятие решения.

Общие показатели. Основным показателем эффективности ЭМ является удельная масса $m = M / (N_{\text{дп}} \tau)$, где M — суммарная масса энергетического оборудования и прочного корпуса, кг; $N_{\text{дп}}$ — мощность, отдаваемая потребителю электроэнергии, кВт; τ — автономность, ч. Масса энергетического модуля $M = M_{\text{до}} + M_{\text{ПК}}$. Масса энергетического оборудования $M_{\text{до}} = M_{\text{из}} + M_{\text{ТЭО}}$, где $M_{\text{из}}$ — масса источника энергии. Полезная мощность $N_{\text{дп}} = N_{\text{Г}} - N_{\text{сн}} = N_{\text{е}} \eta_{\text{Г}} - N_{\text{сн}}$, где $N_{\text{Г}}$, $\eta_{\text{Г}}$ — эффективные мощность и КПД электрогенератора; $N_{\text{сн}}$ — мощность, затрачиваемая на собственные нужды ЭМ.

Эффективность преобразования тепловой энергии в механическую характеризуется эффективным КПД газотурбопривода (теплоемкость гелий-кислородной смеси в рассматриваемом диапазоне параметров практически постоянна)

$$\eta_{\text{е}} = \frac{\eta_{\text{м}} \eta_{\text{Г}}^{\text{м}} (1 - \kappa \pi_{\text{к}}^{\text{м}}) \frac{T_1}{T_3 \eta_{\text{к}}} (\pi_{\text{к}}^{\text{м}} - 1)}{r \eta_{\text{Г}}^{\text{м}} (1 - \kappa \pi_{\text{к}}^{\text{м}}) \frac{T_1}{T_3} (1 - r) (\pi_{\text{к}}^{\text{м}} - 1) + (1 - r) (1 - \frac{T}{T_3})}$$

$$\text{где } \kappa = \left[\frac{1 - (\Delta p_{\text{р.х}} + \Delta p_{\text{Т.А}}) / p_2}{1 + (\Delta p_{\text{р.г}} + \Delta p_{\text{о}}) / p_4} \right]^{\frac{n}{\gamma - 1}} \cdot \frac{k - 7}{k}$$

$\eta_{\text{м}}$ — механический КПД турбины, $\eta_{\text{Г}}$, $\eta_{\text{к}}$ — внутренние КПД турбины и компрессора; $\pi_{\text{к}}$ — степень повышения давления в компрессоре, T_1 , T_3 — температуры рабочего вещества перед компрессором и турбиной; r — степень регенерации; $\Delta p_{\text{р.х}}$, $\Delta p_{\text{р.г}}$, $\Delta p_{\text{Т.А}}$, $\Delta p_{\text{о}}$ — потери давления в регенераторе по холодной и горячей сторонам, в ТА и охладителе

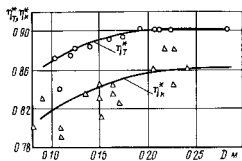


Рис. 4.3 Зависимости для определения КПД турбины и компрессора

ним диаметром 1,5 мм (что возможно в случае закрытого цикла) и расположением каналов теплоносителей под углом 60°. Эта поверхность обеспечивает достаточно малую массу, объем и площадь проходного сечения матрицы по сравнению с другими компактными поверхностями и в этом отношении близка к оптимальной.

Масса регенератора $M_p = \eta_p M_{мр}$, где $M_{мр}$ — масса матрицы регенератора; η_p — коэффициент, большой единицы. Массы матрицы регенератора $M_{мр} = V_{мр} (1 - \varphi) \rho_p$, где $V_{мр}$ — объем матрицы; ρ_p — плотность материала регенератора; φ — коэффициент проходного сечения. Объем матрицы регенератора $V_{мр} = F_p / \Omega_p$, где F_p — площадь поверхности теплообмена, м²; Ω_p — коэффициент компактности поверхности, м²/м³. Площадь поверхности теплообмена $F_p = G_{ср} \theta_p / k_p$, где $\theta_p = f(r)$ — коэффициент эффективности теплообмена, k_p — коэффициент теплопередачи, c_p — теплоемкость.

Охладитель газа. Выполняется одноходовым по газу и многоходовым по воде используется трубчатая поверхность с гребками малого диаметра.

Масса охладителя $M_{о1} = \eta_{о1} M_{м,о1}$, где $M_{м,о1}$ — масса матрицы охладителя; $\eta_{о1}$ — коэффициент, большой единицы.

Масса матрицы охладителя $M_{м,о1} = m_{о1} z_{о1} l_{о1}$, где $m_{о1}$ — погонная масса гребки охладителя, кг/м; $z_{о1}$ — число гребков в охладителе; $l_{о1}$ — длина матрицы охладителя, м.

Число гребков $z_{о1} = F_{о1} / (\pi d_{гр} l_{о1})$. Площадь поверхности теплообмена и объем матрицы охладителя $F_{о1} = G_{ср} \theta_{о1} / k_{о1}$, $V_{м,о1} = F_{о1} / \Omega_{о1}$, где $\theta_{о1}$, $k_{о1}$, $\Omega_{о1}$ — параметры охладителя, аналогичные соответствующим параметрам регенератора.

Охладитель второго контура. Осуществляет теплообмен между теплоносителем контура охлаждения и окружающей средой. Гребки прямоугольного сечения размещаются на поверхности ПК (на сферической поверхности и частично на цилиндрической). Масса охладителя

определяется длиной и диаметром лабучков турбокомпрессора-генератора, диаметром ПК и, как показали пробы работы, оказывается вполне достаточным для получения высокой степени регенерации ($r > 0,9$). Принимается противоточная схема. В качестве поверхности теплообмена применяется компактная пластинчатая поверхность с эквивалентным

диаметром $M_{о2} = m_{о2} F_{о2}$, где $m_{о2}$ — масса гребка 1 м² поверхности, кг/м²; $F_{о2}$ — площадь поверхности теплообмена, м². Величина $F_{о2}$ определяется аналогично $F_{о1}$ охладителя первого контура.

Генератор. Для рассматриваемого диапазона мощностей применяются высокочастотные бесщеточные генераторы (так называемые генераторы Ланделла), представляющие собой коллекторные машины переменного тока. Ротор составной, имеет разделительную немагнитную проставку. Обширные экспериментальные исследования указывают на целесообразность использования частоты вращения 24 000 об/мин при частоте тока 400 Гц.

Эффективный КПД генератора определяется электрическими и вентиляционными потерями, учитывает потери в подшипниках и в диапазоне мощностей 20–150 кВт лежит в пределах 0,8–0,94 в зависимости от мощности, молекулярной массы гелий-ксеноновой смеси и частоты вращения ротора. С увеличением мощности КПД генератора возрастает с увеличением молекулярной массы смеси и частоты вращения уменьшается. Масса генератора определяется совместно с турбокомпрессором (рис. 4.4).

Прочный корпус. Масса сфероцилиндрического прочного корпуса определяется в функции диаметра, длины, толщины стенки, плотности материала. Если корпус ТА является одновременно прочным, то в данном случае масса цилиндрической части корпуса вычисляется по длине $L_{ПК}$.

4.2 Целевая функция и оптимальные параметры

Для практических расчетов и решения задачи оптимизации основных параметров ЭМ целесообразно применять выражение для целевой функции в виде полиномиальной модели второго порядка [6].

К числу наиболее сильно влияющих на удельную массу и габариты ЭМ параметров следует отнести степень повышения давления в компрессоре π_k , степень регенерации r , температуру газов перед турбиной T_3 , молекулярную массу гелий-ксеноновой смеси $M_{см}$, толщину изоляции $\delta_{из}$, наружный диаметр ТА d_{1A} , температуру нагрева графитовой матрицы $T_{и1}$, полезную мощность газотурбогенератора $N_{гг}$, автономность τ , температуру газа перед компрессором T_1 , плотность графита ρ_T относитель-

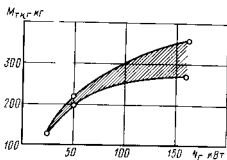


Рис. 4.4 Зависимости для определения массы турбокомпрессора-генератора

ную теплопроводность изоляции A В этом случае удельная масса $m = f(\pi_K, r, T_1, M_{CM}, \delta_{HJ}, d_{TA}, T_H, N_H, T, T_1, \rho_T, A, \rho_{ПК}, t_{ПК})$. Очевидно, от этих же параметров зависит и длина энергетического модуля L

При определении эффективности ЭМ в целом параметры отдельных блоков принимаются оптимальными по частным критериям. Общее количество параметров, влияние которых учитывает математическая модель, составляет около 50.

Удельную массу ЭМ можно представить в виде

$$m = m_{Э.0} + m_{ПК} \quad (4.1)$$

где $m_{Э.0}$, $m_{ПК}$ — удельные массы энергетического оборудования и ПК. При этом $m_{Э.0} = M_{Э.0} / (N_H T)$; $m_{ПК} = M_{ПК} / (N_H T)$

Длину ЭМ в соответствии с компоновкой можно определить по выражению $L = L_T + d_{ПК}/2$, где $L_T = L_{ТЭО} + L_{ТА}$.

Наиболее трудоемким процессом является определение значений $m_{Э.0}$ и L_T в функции перечисленных выше параметров. Поэтому для определения именно этих показателей целесообразно иметь соответствующие регрессионные модели вида

$$m_{Э.0} = b_0 + \sum_{i=1}^{12} b_i \tilde{x}_i + \sum_{i,j=1}^{12} b_{ij} \tilde{x}_i \tilde{x}_j \quad (4.2)$$

$$L_T = b_0 + \sum_{i=1}^{12} b_i \tilde{x}_i + \sum_{i,j=1}^{12} b_{ij} \tilde{x}_i \tilde{x}_j$$

В записанных выражениях связь относительных и действительных параметров выражается зависимостью $\tilde{x}_i = (x_i - x_{i0})/a_i$, где $\tilde{x}_i$ — относительное значение i -го параметра; x_i — абсолютное значение этого же параметра; x_{i0} — абсолютное значение i -го параметра в центральном точке; a_i — шаг изменения i -го параметра.

Для каждого выражения коэффициенты b_0 , b_i , b_{ij} имеют свои значения. Построение моделей выполняется с использованием трехуровневых планов Бокса — Бенкина [6]

Нижний и верхний уровни варьирования параметров для регрессионных моделей, охватывающих требуемый диапазон изменения мощности и автономности, приведены в табл. 4.1.

Задачу оптимизации параметров ГГГ с ТА на верхнем иерархическом уровне сформулируем следующим образом: найти значения параметров, обеспечивающих для заданных мощности и автономности минимальное значение удельной массы ЭМ при наличии областных и функциональных ограничений

Таблица 4.1 Диапазоны изменения параметров

Параметр	Уровни варьирования — 1											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
π_K	1,7–2	1,8–2,1	1,8–2,1	1,8–2,1	1,8–2,1	1,8–2,1	1,8–2,1	1,8–2,1	1,8–2,1	1,8–2,1	1,8–2,1	1,8–2,1
r	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
T_3, K	1100–1200	1100–1200	1100–1200	1100–1200	1100–1200	1100–1200	1100–1200	1100–1200	1100–1200	1100–1200	1100–1200	1100–1200
$M_{CM}, кг/кг\cdotмол\cdotч$	0,75	0,75–0,85	0,75–0,85	0,75–0,85	0,75–0,85	0,75–0,85	0,75–0,85	0,75–0,85	0,75–0,85	0,75–0,85	0,75–0,85	0,75–0,85
$\delta_{HJ}, м$	0,08	0,08–0,12	0,08–0,12	0,08–0,12	0,08–0,12	0,08–0,12	0,08–0,12	0,08–0,12	0,08–0,12	0,08–0,12	0,08–0,12	0,08–0,12
$d_{TA}, м$	1,1–1,5	1,1–1,6	1,1–1,6	1,1–1,6	1,1–1,6	1,1–1,6	1,1–1,6	1,1–1,6	1,1–1,6	1,1–1,6	1,1–1,6	1,1–1,6
T_H, K	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300
T_H, K	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500
$T, Вт$	30–50	30–50	30–50	30–50	30–50	30–50	30–50	30–50	30–50	30–50	30–50	30–50
$\rho, кг/м^3$	15–30	15–30	15–30	15–30	15–30	15–30	15–30	15–30	15–30	15–30	15–30	15–30
T_1, K	285–290	285–290	285–290	285–290	285–290	285–290	285–290	285–290	285–290	285–290	285–290	285–290
$\rho, кг/м^3$	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
A	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
	1,2–1,6	1,2–1,6	1,2–1,6	1,2–1,6	1,2–1,6	1,2–1,6	1,2–1,6	1,2–1,6	1,2–1,6	1,2–1,6	1,2–1,6	1,2–1,6

Математическая формулировка задачи: выбрать вектор-параметр $\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ из условия минимума функции $m = n[\bar{X}, Y(\bar{X}), Z]$ при наличии областных и функциональных ограничений вида $X_{\min} \leq X_i \leq X_{\max}$ и $Y_{\min} \leq Y[\bar{X}, Y(\bar{X})] \leq Y_{\max}$. Значения дискретно изменяющихся параметров Z находятся путем сопоставления эффективности ряда вариантов и отбора наиболее приемлемых.

В соответствии с математической моделью эффективности ЭМ к числу непрерывно изменяющихся оптимизируемых параметров следует отнести: степень повышения давления в компрессоре π_k , степень регенерации r , температуру газов перед турбиной T_3 , молекулярную массу газов гелий-ксеноновой смеси $M_{см}$, толщину изоляции $\delta_{из}$, наружный диаметр теплового аккумулятора $d_{ТА}$. Величина целевой функции находится по выражению (4.1).

Рассматриваемая задача оптимизации относится к задачам нелинейного программирования. Вместе с тем формализация выражения для $m_{э,0}$ в виде регрессионной модели второго порядка (4.2) позволяет свести поставленную задачу к задаче выпуклого программирования. Значения оптимальных параметров находятся методом случайного поиска.

Наличие регрессионных моделей для различного диапазона изменения мощности и автономности позволяет решать поставленную задачу при различных условиях проектирования.

Задача оптимизации решена для следующих условий: $N_{\text{п}} = 30$ – 150 кВт; $\tau = 15$: 250 ч; $\rho_{\text{ПК}} = 7850$ кг/м³; $t_{\text{ц}} - t_{\text{с}}$ $t_{\text{ПК}}$ 10; 50 мм

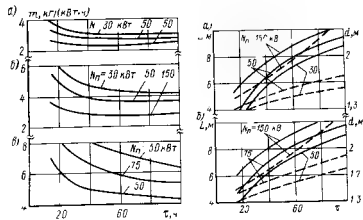


Рис. 4.5 Зависимости удельной массы модуля от автономности при различных значениях мощности а $t_{\text{ПК}}$ 0, б $t_{\text{ПК}}$ 10 мм а $t_{\text{ПК}}$ 50 мм

Рис. 4.6 Зависимости длины и диаметра модуля от автономности а $t_{\text{ПК}}$ 10 мм б $t_{\text{ПК}}$ 50 мм — d f(t) L f(t)

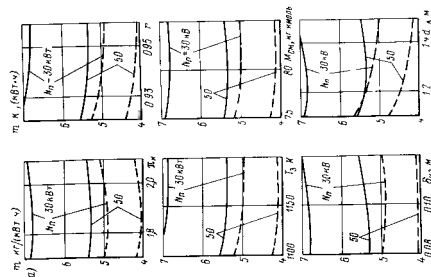


Рис. 4.7 Зависимости удельной массы модуля от оптимизируемых параметров а $N_{\text{п}}$ 30 50 кВт, б $N_{\text{п}}$ 75, 150 кВт — r 15 ч $t_{\text{ПК}}$ 30 ч $t_{\text{ПК}}$ 10 мм

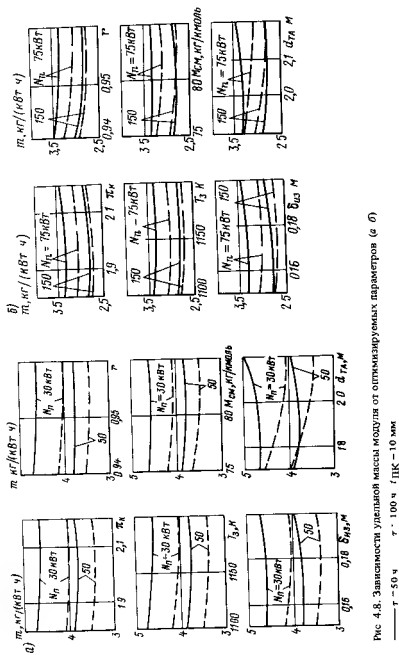


Рис 4.8. Зависимости удельной массы модуля от оптимизируемых параметров (а б)

$T_n = 3500$ К; $T_1 = 288$ К; $\rho_T = 1700$ кг/м³ А 1,2 Материал прочного корпуса – высокопрочная сталь

На рис. 4.5 и 4.6 даны зависимости, позволяющие определить удельную массу, длину и диаметр ЭМ в наиболее характерном диапазоне изменения N_n , $t_{ПК}$. Значения m , L , d приведены при оптимальных параметрах. Величина m при $t_{ПК} = 0$ находится по (4.1) для $m_{ПК} = 0$

Влияние оптимизируемых параметров на удельную массу модуля определено по зависимостям (4.1) и (4.2) при условии, что один параметр изменяется, а остальные пять являются оптимальными. Полу

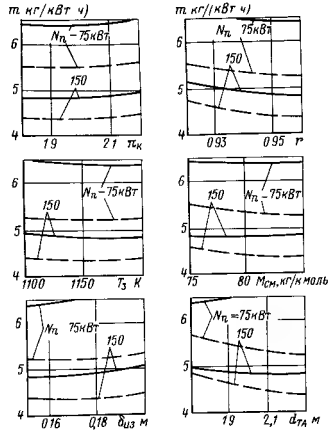


Рис 4.9. Зависимости удельной массы модуля от оптимизируемых параметров

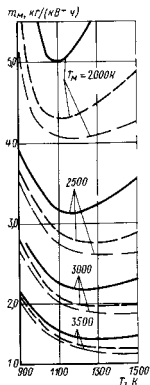
— $\tau = 50$ ч, — $\tau = 100$ ч $t_{ПК} = 50$ мм

ченные таким образом зависимости приведенные на рис. 4.7 4.9, или позволяют оценить увеличение удельной массы модуля при отклонении ряда параметров от оптимальных. Этот вопрос приобретает особую важность при решении задачи унификации энергетического оборудования

4.3. Возможности утилизации теплоты аккумулятора

Особенностью работы ГГ с тепловым графитовым аккумулятором является достаточно высокий нижний температурный уровень матрицы, который практически равен T_3 . При этом определенное количество теплоты остается неиспользованным. Оставшееся количество теплоты которое теоретически может быть утилизировано, равно

$$q_{yt} \propto \left| \frac{T_a^3}{T_a} (T_3 - T_a) \right|$$



где T_a — температура ТАМ до нагрева $c|T_a^3$ — средняя теплоемкость ТАМ. В действительности только часть этой теплоты может быть утилизирована. Коэффициент утилизации

$$\eta_y = \frac{q_y}{q_{yt}} = \frac{c \left| \frac{T_d^3}{T_d} (T_3 - T_d) \right|}{c \left| \frac{T_a^3}{T_a} (T_3 - T_a) \right|}$$

где q_y — действительно располагаемое количество теплоты, которое может быть утилизировано, T_d — действительная минимальная температура, при которой еще возможно реализовать утилизацию теплоты в предпологаемом утилизационном паровом контуре. Относительная величина теоретического количества утилизируемой теплоты β_t

Рис. 4.10 Зависимости удельной массы матрицы теплового аккумулятора от максимальной температуры диска преобразователя энергии при отсутствии и наличии утилизации

— установка без утилизации теплоты, установка с утилизацией теплоты $\eta_y = 0,17$ установка с утилизацией теплоты, $\eta_y = 0,25$

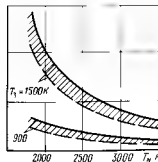


Рис. 4.11 Зависимости коэффициента η_y от температуры T_m — $\eta_y = 0,17$ — $\eta_y = 0,25$

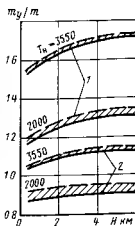


Рис. 4.12. Зависимости удельной массы установки с тепловым аккумулятором, обусловленные утилизацией, от T_m

$-q_{yt} q_{pt}$, где q_{pt} — теоретическое количество теплоты, запасенное в ТА в диапазоне температур от T_a до T_m . Величина q_{pt} определяется по аналогичным зависимостям для q_p при T_1 теплоты аккумулятора $\eta_a = q_p/q_{pt}$.

Действительно использованная для превращения в механическую энергию часть утилизируемой теплоты по отношению к реально превращенной в механическую энергию в основном цикле и утилизационном контуре составит $\eta_g - q_y \eta_y (q_p \eta_e + q_y \eta_y) \beta (1 + \beta)$. Здесь $\beta = q_y \eta_y (q_p \eta_e) = \beta_y \psi_y \eta_y (\eta_g \eta_e)$, где η_e, η_y — КПД, с которыми происходит преобразование тепловой энергии в механическую в основном цикле и утилизационном контуре.

Оценка целесообразности утилизации теплоты в этом случае вы полнена при использовании ТА с графитовой матрицей и паротурбинного утилизационного контура. Начальная температура нагрева ТАМ $T_m = 2000 \div 3550$ К, нижний температурный уровень $T_3 = 900 \div 1500$ К. В диапазоне $T_3 = 1300 \div 1500$ К потери на охлаждение приняты 3–5 %. Степень повышения давления лежит в диапазоне $\pi = 1,7 \div 1,9$.

При принятых параметрах рабочего вещества КПД газотурбопривода η_e лежит в диапазоне 0,28–0,53. КПД утилизационного контура η_y может лежать в диапазоне 0,17–0,25 (действительная минимальная температура принята $T_d = 600$ К). Учтены затраты мощности на прокачку газа через ТА при работе теплоутилизационного контура

На рис. 4.10 приведены зависимости удельной массы матрицы ТАм в функции T_3 для различной температуры нагрева. С увеличением T_3 и уменьшением T_2 влияние утилизации существенно уменьшается (рис. 4.11). Кроме того, введение утилизационного контура увеличивает массу ТЭО и его объем. Последнее весьма существенно, так как влечет за собой увеличение массы ПК.

Влияние температуры нагрева матрицы на отношение удельной массы ГТУ с теплоизоляционным контуром к соответствующей величине без утилизационного контура показана на рис. 4.12.

В большинстве случаев введение утилизационного контура ведет к заметному увеличению удельной массы установок. Лишь при $T_H = 2000$ К и энергоемкости 2000 кВт·ч утилизация приводит к снижению удельной массы на 5–12 %. Приведенные данные свидетельствуют о нецелесообразности утилизации теплоты ТА газотурбинной установки путем применения паротурбинного утилизационного контура.

Наиболее приемлемым следует считать использование части оставшейся теплоты в аккумуляторе путем уменьшения начальной температуры перед турбиной до T_3 , которая также должна оптимизироваться. Выполненный анализ показал, что ее оптимальная величина лежит в районе 900 К. При этом можно реализовать дополнительно 3–4 % проектной энергоемкости. Эту величину следует рассматривать как некий аварийный запас.

4.4 Рекомендации для проектирования

Разработка ГТГ с ТА для широкого диапазона мощности и автономности связана с решением ряда вопросов: унификацией отдельных блоков и ЭМ в целом; определением параметров и числа базовых унифицированных модулей; выбором типа и числа ЭМ для конкретных условий эксплуатации.

Сравнение показателей ГТГ с ТА мощностью 30–150 кВт показывает, что для этого диапазона реально применение единого турбокомпрессора-генератора, рассчитанного для $N_d = 150$ кВт. Это оказывается возможным, так как при принятой геометрии лопаточных машин величина требуемой мощности достигается путем установления соответствующего давления смеси перед компрессором в контуре. Так как частота вращения турбокомпрессора-генератора постоянна и равна 24 тыс. об/мин, то для обеспечения оптимальных характеристик турбины и компрессора для всего диапазона N_H необходимо принять единую величину температуры перед турбиной T_3 и степень повышения давления в компрессоре π_K . Анализ полученных результатов (см. рис. 3.7–3.9) показывает, что этот подход может быть реализован без значительного изменения удельной массы модуля.

Эффективность электрогенератора, спроектированного на расчетный режим для $N_H = 150$ кВт и работающего на частичных режимах незначительно ниже, чем эффективность специально спроектированных

электрогенераторов для меньших мощностей. Это делает обоснованным использование единого электрогенератора и, таким образом, унифицированного в целом турбокомпрессора-генератора. При этом для малых N_H масса энергетического оборудования вследствие этого несколько увеличивается.

Теплообменные аппараты (регенератор, охладители) вследствие их сравнительной простоты изготовления и существенного отличия в массе для разных N_H целесообразно проектировать под требуемую мощность. Унификация теплообменных аппаратов легко обеспечивается при заданной мощности для всего диапазона изменения T .

Весьма важным является унификация ТА. Здесь целесообразно реализовать следующие подходы. Для принятого диаметра матрицы и толщины изоляции унифицируются секции аккумулятора. Каждая секция имеет индивидуальный индуктор, и энергоемкость в этом случае может увеличиваться дискретно в соответствии с величиной энергоемкости секции.

Следующим этапом является унификация секций аккумулятора по диаметрам. Анализ полученных данных указывает на целесообразность унификации диаметра для всего диапазона мощностей в пределах заданной автономности. Разработка трех типоразмеров секций матриц по диаметру и двух по длине позволяет создавать модули различной энергоемкости с параметрами энергетического оборудования, близкими к оптимальным.

Определение параметров и числа базовых унифицированных модулей представляет собой также задачу оптимизации. Ее решение требует необходимой информации по требуемому числу модулей определенного диапазона энергоемкостей. При отсутствии такой информации задача может быть решена в первом приближении исходя из конкретных условий эксплуатации.

Практически важной задачей является выбор типа и числа ЭМ для обеспечения требуемых мощностей и автономности с учетом графика нагрузки. Если требуемая автономность соответствует таковой для базового модуля унифицированного ряда, то заданную мощность можно обеспечить путем увеличения числа модулей (два, три и т. д.). Величина мощности в этом случае меняется дискретно. Возможен вариант, когда требуемые N_H и τ обеспечиваются одним модулем большей энергоемкости или двумя (тремя) модулями меньшей энергоемкости. В этом случае вопрос следует решать путем всестороннего анализа условий эксплуатации, обеспечения надежности и т. д.

При определении максимальной единичной энергоемкости модуля необходимо учитывать также предельно допустимые его габариты и массу с точки зрения монтажа и транспортировки. В целом применение модульного принципа и унификации при проектировании турбогенераторов позволяет повысить надежность оборудования, снизить его стоимость, обеспечить требуемые мощность и автономность.

5 ПАРАМЕТРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ НА БАЗЕ СТИРЛИНГ-ГЕНЕРАТОРА И ГЕНЕРАТОРОВ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

5.1. Эффективность двигателя Стирлинга с тепловым графитовым аккумулятором и энергетического модуля

Исходные положения Одним из возможных типов привода электрогенераторов мощностью 30–150 кВт является ДС, обладающий рядом преимуществ. Требование малой удельной массы стирлинг-генератора приводит к необходимости использования высокотемпературного аккумулятора. Аналогично вышесказанному рассматривается стирлинг-генератор с тепловым графитовым аккумулятором в модульном исполнении (рис. 5.1, а) [7]. Основные особенности, обусловленные тепловой схемой (рис. 5.1, б) и компоновкой стирлинг-генератора с тепловым графитовым аккумулятором следующие.

- применение многосилиндрового ДС двойного действия с наклонной лямбдой (рабочее вещество внутреннего контура – гелий);
- наличие вентилятора для обеспечения циркуляции теплоносителя (гелий-ксеноновой смеси) с целью передачи теплоты от ТА нагревателя ДС;

- наличие мультипликатора между ДС и высокочастотным электрогенератором (частота вращения 24 тыс. об/мин, частота тока 400 Гц) привод вентилятора от мультипликатора.

Общие показатели. Основным показателем эффективности энергетического модуля является его удельная масса, $кг/(кВт \cdot ч)$, $m \cdot M/(N_{\text{н}} \cdot t)$ где M – суммарная масса энергетического оборудования и прочного корпуса, кг, $N_{\text{н}}$ – мощность, отдаваемая потребителю электроэнергии кВт, t – автономность, ч.

Полезная мощность $N_{\text{п}} = N_{\text{Г}} - A_{\text{сн}}$, где $A_{\text{сн}}$ – мощность, вырабатываемая электрогенератором, $A_{\text{сн}}$ – мощность, затрачиваемая на собственные нужды энергетического модуля в целом.

Величина $N_{\text{сн}}$ включает в себя затраты на привод вентилятора $N_{\text{в}}$

и на ось $N_{\text{н}} - N_{\text{в}} = G \cdot c_p \cdot T_{\text{в}} \cdot (\pi_{\text{в}}^{\frac{k-1}{k}} - 1) \cdot \frac{1}{\eta_{\text{в}}}$, $N_{\text{в}} = 0.01 \cdot N_{\text{Г}}$ где G – расход гелий-ксеноновой смеси, c_p – теплоемкость смеси $T_{\text{в}}$ – температура смеси перед вентилятором, $\pi_{\text{в}}$ – степень повышения давления вентилятора, $\eta_{\text{в}}$ – КПД вентилятора.

Эффективность преобразования тепловой энергии в механическую характеризуется КПД двигателя Стирлинга, который может быть определен по [27] $\eta_e = \eta_t \cdot \eta_i \cdot \eta_m$, где η_t – термический КПД цикла Стирлинга, η_i – относительный внутренний КПД, η_m – механический КПД.

Габариты ЭМ определяются в соответствии с компоновкой, приведенной в гл. 4.

Источник энергии. Рассматривается тепловой графитовый аккумулятор. Его масса, длина, диаметр, величина потерь в окружающую среду определяются так, как указано в гл. 4.

Теплоэнергетическое оборудование. В соответствии с тепловой схемой в его состав входят: ДС с нагревательной головкой, мульти

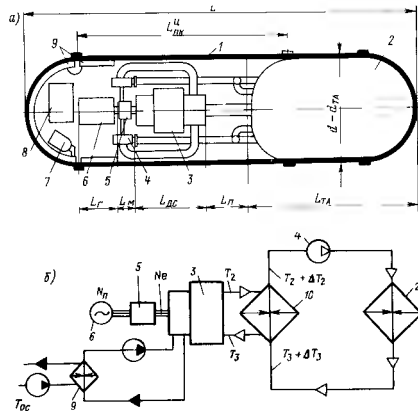


Рис 5.1 Компоновка (а) и тепловая схема (б) стирлинг-генератора
1 – прочный корпус, 2 – тепловой аккумулятор, 3 – двигатель Стирлинга, 4 – вентилятор, 5 – мультипликатор, 6 – электрогенератор, 7 – насос, 8 – блок управления, 9 – концевой охладитель; 10 – нагревательная головка ДС

пликатор, электрогенератор, концевой охладитель, блок управления, другое оборудование.

Масса теплоэнергетического оборудования равна $M_{ТЭО} = M_{ДС} + M_g + M_{м} + M_0 + M_{пр}$, где $M_{ДС}$ - масса ДС с нагревательной головкой; M_g - масса электрогенератора; $M_{м}$ - масса мультипликатора; M_0 - масса концевой охлаждающей; $M_{пр}$ - масса блока управления вентилятора насоса, трубопроводов и др.

В соответствии с компоновкой (см. рис. 5.1, а) ТЭО занимает часть цилиндрической части корпуса $L_{ТЭО} = L_g + L_{м} + L_{ДС} + L_{п}$, где L_g - длина электрогенератора; $L_{м}$ - длина мультипликатора; $L_{ДС}$ - длина ДС с нагревательной головкой; $L_{п}$ - длина пагубов.

Двигатель Стирлинга. Термический КПД идеализированного ДС может быть определен на базе модели Шмидта

$$\eta_T = \frac{\left(\frac{T_3}{T_1} - 1\right)(k-1) \ln \epsilon}{(k-1) \frac{T_3}{T_1} \ln \epsilon + (1-r) \left(\frac{T_3}{T_1} - 1\right)} \quad (5.1)$$

где k - показатель изотропы рабочего вещества внутреннего контура ДС; r - степень регенерации; ϵ - степень сжатия; T_3, T_1 - максимальная и минимальная температуры цикла ДС.

Внутренний КПД реального двигателя может быть найден по выражению $\eta_i = \eta_T \eta_k$, где $\eta_k = \eta_i / \eta_T$, η_i - внутренний КПД реального двигателя, определенный экспериментальным путем [27]; η_T - термический КПД этого же двигателя, определенный по выражению (5.1). На рис. 5.2 приведены зависимости для определения указанных величин. Механический КПД η_m , учитывающий потери в узлах трения, для двигателя с косой шайбой лежит в пределах 0,93–0,95 в зависимости от мощности

Особенностью конструкции ДС, использующего теплоту теплового графитового аккумулятора, является нагревательная головка (или просто нагреватель), размеры которой могут быть значительными, что приводит к увеличению массы цилиндрической части корпуса и модуля в целом. Конструктивно нагреватель выполнен единым для всех цилиндров ДС - используются гребки с шайбовым оребрением (рис. 5.2, в).

Теплоноситель внутреннего контура движется внутри гребка, что связано с высоким (20 МПа) давлением гелия. С наружной оребренной стороны гребки обтекаются в поперечном направлении теплоносителем внешнего контура - смесью гелия и ксенона.

Исходными данными к расчету нагревателя являются его тепловая мощность, температуры на входе и выходе по горячей и холодной сторонам: $T_{г.вх} = T_3 + \Delta T_3$; $T_{г.вых} = T_2 + \Delta T_2$; $T_{х.вх} = T_2$; $T_{х.вых} = T_3$, давления горячего и холодного теплоносителей $p_{г.}$, $p_{х.}$. Количество трубок определяется из условия компоновки

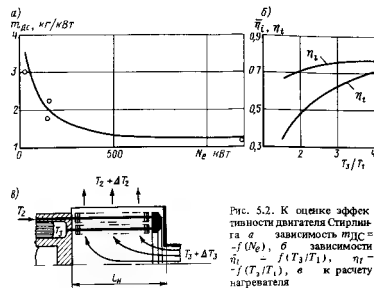


Рис. 5.2. К оценке эффективности двигателя Стирлинга: а - зависимость $\eta_{ДС} = -f(N_e)$; б - зависимости $\eta_i = f(T_3/T_1)$; в - к расчету нагревателя

Расчетная теплопередающая поверхность (суммарная площадь по поверхности гребка диаметром $d_{вн} + \delta_{ст}$) определяется по выражению $F_p = G c_p \theta / k_p$, где G и c_p - расход и теплоемкость теплоносителя с меньшим значением произведения $G c_p$; θ - параметр теплопередачи; k_p - коэффициент теплопередачи

Расходы теплоносителей G_g, G_x определяются из уравнения теплового баланса; параметр теплопередачи связан с температурами теплоносителей и их теплофизическими свойствами зависимостью

$$\theta = f \left(\frac{T_{г.вх}}{T_{х.вх}} \frac{T_{х.вх}}{T_{х.вых}} c^* \right)$$

$$c^* = \begin{cases} \frac{G_g c_{pg}}{G_x c_{px}} & G_g c_{pg} < G_x c_{px} \\ \frac{G_x c_{px}}{G_g c_{pg}} & G_x c_{px} < G_g c_{pg} \end{cases}$$

Коэффициенты теплопередачи и теплоотдачи

$$k_p = \frac{\alpha_{пр.г} \alpha_{пр.х}}{\alpha_{пр.г} + \alpha_{пр.х}}; \alpha_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_k E_p (F_p/F_p)} + 0.5 (\delta_{ст}/\lambda_{ст})} \quad \alpha_k = c Re^n Pr^m \frac{\lambda_g}{d_g}$$

где $\alpha_{пр.г.}$, $\alpha_{пр.х.}$ - приведенные коэффициенты теплоотдачи от горячего и холодного теплоносителей с учетом термического сопротивления

обремененной стенки и гребки; α_k коэффициент теплоотдачи конвекцией; $F_{\text{ст}}, F_p$ отношение площади полной поверхности к расчетной; $\delta_{\text{ст}}, d_g$ толщина стенки гребки и определяющий размер; $\lambda_{\text{ст}}, \lambda_g$ коэффициенты теплопроводности материала стенки и газа; c, n, m — коэффициенты, определяемые для данной поверхности экспериментальным путем; E_p — коэффициент эффективности шайбового обременения.

Таким образом, расчет нагревателя сводится к решению системы алгебраических уравнений, связывающих параметры теплоносителей, характеристики переноса теплоты в каналах, размеры нагревателя, и производится итерационным путем. По заданным температурам, тепловой мощности, свойствам теплоносителей определяется расход газа параметр теплопередачи. Принимаются начальное значение критерия Re определяются коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, размеры на нагревателя и новое значение Re. Определение величины теплопередающей поверхности считается завершённым по достижении заданной точности расчета. Определяется масса M_H и длина L_H нагревателя.

Масса ДС определяется следующим образом: $M_{\text{ДС}} = M'_{\text{ДС}} + M_H$, где $M'_{\text{ДС}}$ — масса ДС без нагревателя; M_H — масса нагревателя ДС. Аналогично длина ДС $L_{\text{ДС}} = L'_{\text{ДС}} + L_H$, где $L'_{\text{ДС}}$ — длина ДС без нагревателя, L_H — длина нагревателя.

Масса двигателя без нагревателя $M_{\text{ДС}} - m_{\text{ДС}} N_0$, где $m_{\text{ДС}}$ — удельная масса ДС, кг/кВт; N_0 — эффективная мощность ДС, кВт. Величина $m_{\text{ДС}}$ определяется по зависимости рис. 5.2, а, построенной с использованием данных [35].

С достаточной для практики степенью точности можно считать плотность двигателя и отношение диаметра к длине величинами постоянными, равными $\rho_{\text{ДС}} = 1438 \text{ кг/м}^3$ и $(d/L)_{\text{ДС}} = 0,6$.

Тогда объем, длина и диаметр ДС без нагревателя определяются по формулам

$$V'_{\text{ДС}} = \frac{M_{\text{ДС}}}{\rho_{\text{ДС}}}, \quad L_{\text{ДС}} = \sqrt{\frac{4V_{\text{ДС}}}{\pi \left(\frac{d}{L}\right)_{\text{ДС}}^2}}, \quad d_{\text{ДС}} = L_{\text{ДС}} \left(\frac{d}{L}\right)_{\text{ДС}}$$

Электрогенератор с мультипликатором. Эффективный КПД высокочастотного электрогенератора и его масса определяются по рекомендациям гл. 3. В диапазоне мощностей 20–160 кВт КПД генератора лежит в пределах 0,8–0,94, масса — в пределах 80–300 кг. Мультипликатор используется унифицированный для всего диапазона мощностей, он представляет собой двухступенчатую планетарную передачу. Масса мультипликатора составляет 50 кг, КПД — 0,98–0,99. Длина электрогенератора с мультипликатором равна 0,95 м.

Концевой охладитель. По назначению и конструктивно-исполнению аналогичен таковому у ГТГ с ГА. Масса охладителя определяется аналогично рекомендациям гл. 4.

Прочный корпус. Масса сфероцилиндрического корпуса определяется в функции его диаметра, длины цилиндрической части $L_{\text{ПК}}$, толщины стенки $t_{\text{ПК}}$ плотности материала.

Оптимальные параметры. При решении задачи оптимизации параметров ЭМ на базе стирлинг-генератора с тепловым графитовым аккумулятором в качестве целевой функции принимаем также удельную массу кт/(кВт·ч), $m = f(T_3, \Delta T_2, \Delta T_3, M_{\text{см}}, \delta_{\text{из}}, d_{\text{ТА}}, N_{\text{п}}, \tau, \rho_{\text{Т}}, A, \rho_{\text{ПК}}, t_{\text{ПК}})$, где T_3 — максимальная температура цикла ДС; $\Delta T_2, \Delta T_3$ — температурные напоры на выходе и входе нагревателя ДС; $M_{\text{см}}$ — молекулярная масса гелий-ксеронового смеси во внешнем контуре; $\delta_{\text{из}}$ — толщина изоляции ГА; $d_{\text{ТА}}$ — диаметр ГА; $N_{\text{п}}$ — полезная мощность стирлинг-генератора, τ — автономность; $\rho_{\text{Т}}$ — плотность графитовой матрицы; A — коэффициент, учитывающий свойства изоляции; $\rho_{\text{ПК}}$ — плотность материала ПК; $t_{\text{ПК}}$ — толщина стенки корпуса.

Задача оптимизации непрерывно изменяющихся параметров $T_3, \Delta T_2, \Delta T_3, M_{\text{см}}, \delta_{\text{из}}, d_{\text{ТА}}$ решена при следующих условиях: $N_{\text{п}} = 30, 50, 150 \text{ кВт}$

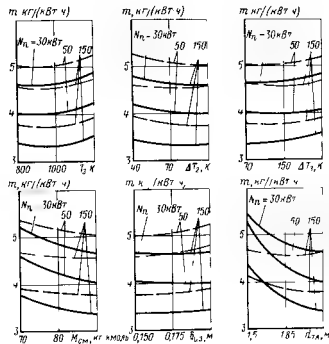


Рис. 5.3. Влияние оптимизируемых параметров на удельную массу энергетического модуля на базе двигателя Стирлинга и теплового аккумулятора

— $\tau = 100 \text{ ч}$, — $\tau = 30 \text{ ч}$, — $\tau = 15 \text{ ч}$

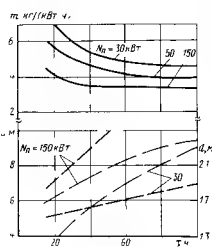


Рис. 5.4. Зависимости m , $f(\tau, N_n)$, d , $f(\tau, N_n)$, L , $f(\tau, N_n)$ от температуры T и диаметра d модуля

теплоты за счет уменьшения срабатываемой разности температур T_n и T_3 . Оптимальные диапазоны значений температурных напоров на входе в нагреватель и выходе из него составляют $\Delta T_3 = 100 \div 120$ К, $\Delta T_2 = 80 \div 100$ К. Уменьшение температурных напоров приводит к росту энергоемкости ТА, увеличению длины нагревателя (вследствие увеличения θ) и росту $N_{г.н}$ (вследствие возрастания расхода гелий-ксеноновой смеси).

Оптимальное значение молекулярной массы гелий-ксеноновой смеси оказывается равным максимальному (из рассмотренного диапазона), что связано с более значительным уменьшением потерь теплоты в окружающую среду при уменьшении коэффициента теплопроводности смеси по сравнению с увеличением длины нагревателя и корпуса, соответствующего изменению масс ТА, ДС, корпуса. Это подтверждается увеличением наклона зависимости $m - f(M_{г.н})$ при увеличении τ .

Оптимальные значения диаметра теплового аккумулятора $d_{ТА}$ находятся в диапазоне 1,9–2,2 м, что является следствием изменения потерь теплоты в окружающую среду, а следовательно, и массы ТА и корпуса.

Приведенные зависимости позволяют оценить увеличение удельной массы модуля при отклонении параметров от оптимальных значений, что приобретает особую важность при решении задачи их унификации. На рис. 5.4 приведены зависимости, позволяющие определить удельную массу, диаметр и длину ЭМ на базе ДС с тепловым графитовым аккумулятором в широком диапазоне изменения N_n и τ при оптимальных значениях варьируемых параметров

τ 15, 30, 100 ч, $\rho_{ПК} = 7850$ кг/м³, $f_{ПК} = 0$ и 10 мм, $T_n = 3500$ К, $T_{о.с} = 277$ К, $\rho_t = 1700$ кг/м³, $A = 1.2$

Влияние параметров на удельную массу определено при условии, что пять из них имеют оптимальное значение, а один изменяется от минимального до максимального значения, что соответствует сечению гиперповерхности плоскостью, параллельной координатным осям и проходящей через точки с минимальным значением m при заданных условиях (рис. 5.3).

Оптимальное значение температуры T_3 находится в диапазоне 900–1000 К, что соответствует температурам современных ДС. Наличие оптимальной T_3 связано с тем, что при возрастании T_3 увеличивается КПД цикла ДС, но уменьшается количество запасенной в ТА

5.2. Особенности энергетических модулей с прямым преобразованием энергии тепловых графитовых аккумуляторов

Специфические условия работы ЭУ ряда технических средств освоения океана делают правомерным рассмотрение вопроса о применении прямого преобразования тепловой энергии графитового аккумулятора в электрическую и разработку на этой основе ЭМ.

В первую очередь речь идет об использовании термоэлектрических (ТЭГ) и термоэмиссионных (ТЭМГ) генераторов. Вопросу исследования и разработки ТЭГ и ТЭМГ различного целевого назначения посвящен ряд работ [16, 18, 21, 29, 33].

Генераторы прямого преобразования тепловой энергии в электрическую имеют следующие преимущества: отсутствие подвижных элементов конструкции; высокую надежность; большой ресурс; отсутствие шума; примерно одинаковую эффективность установок малой и большой мощности; широкий температурный диапазон, в котором могут работать генераторы, что позволяет использовать каждый тип генератора в условиях, близких к оптимальным; не требуется постоянного обслуживания – следовательно, эти преобразователи хорошо приспособлены для создания автономных источников энергии.

К числу недостатков следует отнести относительно низкий КПД таких генераторов, что приводит к необходимости повышения температуры и применения комбинированных установок, обеспечивающих повышение их эффективности.

В то же время наличие заборной воды как холодильника позволяет существенно упростить систему отвода теплоты по сравнению с радиаторной системой в других областях техники [16, 18, 21, 29] и реализовать более низкий температурный уровень холодных спаев ТЭГ, что в свою очередь, ведет к росту КПД.

Стремление обеспечить минимальную удельную массу ЭМ делает целесообразным применение ТЭМГ на более высоком температурном уровне и ТЭГ на низком температурном уровне.

Передача теплоты от аккумулятора к ТЭМГ осуществляется с помощью высокотемпературных тепловых труб. Оставляя в стороне вопросы конструктивного исполнения этого решения, выбора материалов, обеспечения требуемого остывания матрицы и другие специфические вопросы, заметим, что такие тепловые трубы могут работать при температурах 1800–2700 К. Так как нижний уровень температур в ТЭМГ всегда высок и находится в диапазоне 800–1000 К, то именно здесь уместен ТЭГ. Отвод теплоты от холодных спаев ТЭГ осуществляется низкотемпературными тепловыми трубами, которые отдают теплоту заборной воде через ПК модуля.

Применение 2-каскадного преобразователя позволяет ожидать достаточно высокое значение КПД. При этом, однако, уменьшается количество

теплоты, запасенной в аккумуляторе, по сравнению с применением машинного преобразователя из-за существенного возрастания температуры T_3 что ставит вопрос о выборе ее оптимального значения.

5.3. Эффективность термоэлектрических и термоэмиссионных генераторов

Термоэлектрические генераторы. Эффективность ТЭГ как преобразователей тепловой энергии в значительной степени зависит от температур горячего T_h и холодного T_c спаев ТЭГ могут работать как при сравнительно низких температурах (500–600 К), так и при достаточно высоких температурах (до 1500 К) [21]. Выбор величины температуры

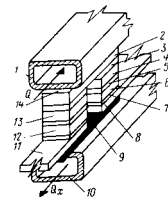


Рис. 5.5 Схема термоэлектрического преобразователя

1 – подиод горячего теплоносителя 2 – соединительная шина горячего спая, 3 – коммутационный припой спая, 4 – решетка (высокотемпературная часть), 5 – коммутационный припой, 6 – решетка (низкотемпературная часть), 7 – припой холодного спая, 8 – термоэлектрический материал, 9, 14 – соединительные шины холодного спая, 10 – подиод холодного теплоносителя, 12 – решетка (низкотемпературная часть), 13 – решетка (высокотемпературная часть)

горячего спая представляет собой достаточно сложную задачу оптимизации параметров ЭУ с учетом типа источника энергии (в рассматриваемом случае – теплового графитового аккумулятора), принятого критерия оптимальности (для технических средств освоения океана как правило, удельной массы ЭМ) и других условий

Кроме того, эффективность ТЭГ определяется величиной параметра добротности z , которая зависит от применяемых материалов ТЭГ. Термоэлектрический преобразователь (рис. 5.5) как элемент ТЭГ представляет собой многослойную конструкцию, что делает необходимым подбор материалов с определенными свойствами. При этом следует иметь в виду, что свойства материалов также меняются с изменением температуры. Если принять, что свойства материалов постоянные, то КПД термоэлектрического генератора определится по выражению [21]

$$\eta = \eta_K \eta_{\text{уст}} \frac{\Delta T}{T_c} \times \frac{m}{n + 1, (z T_c)^2 + T_{\text{сп}} / T_c}$$

где η_K – КПД цикла Карно; $\eta_{\text{уст}}$ – условный термоэлектрический КПД $m = R_H / R$ – относительное сопротивление нагрузки; $T_{\text{сп}} = (T_h + T_c) / 2$.

При $m = m_{\text{опт}}$ ТЭГ работает в режиме максимальной мощности. Величина КПД определится по выражению

$$\eta = \eta_K \frac{m_{\text{опт}}}{m_{\text{опт}} + \frac{1}{T_c}}$$

где $m_{\text{опт}} = \sqrt{1 + z T_{\text{сп}}}$.

Сила тока, общее напряжение и общая генерируемая электрическая мощность находятся следующим образом

$$I_{\text{опт}} = \frac{\alpha \Delta T}{R(1 + M)} \quad U_{\text{опт}} = \frac{\alpha \Delta T m_{\text{опт}}}{1 + m_{\text{опт}}} \quad P_{\text{опт}} = \frac{m_{\text{опт}}}{R} \left(\frac{\alpha \Delta T}{1 + m_{\text{опт}}} \right)^2$$

Эффективность применяемого материала часто определяют по выражению $\epsilon = (\sqrt{1 + z T_c} - 1) / (\sqrt{1 + z T_h} + 1)$.

В области высоких температур (1300–1600 К) находят применение силициды, карбиды бориды и селениды некоторых переходных металлов. Достаточно исследованными и поэтому нашедшими применение в высокотемпературных термоэлектрических генераторах являются кремний-германиевые системы, которые при легировании галлием и бромом имеют проводимость p -типа, а при легировании фосфором и мышьяком – n -типа.

Коэффициент добротности полупроводниковых материалов имеет явно выраженный экстремум что делает необходимым их эксплуатацию

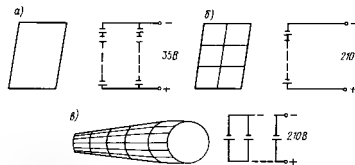


Рис. 5.6 Схема ТЭГ с использованием панелей а – панель (382 термоэлемента, соединенных последовательно-параллельно, 0,5 Вт панель, 0,183 В панель), б – блок (6 панелей, соединенных последовательно, 174 Вт панель, 35 В панель), в – система (96 панелей, соединенных параллельно, 1,024 кВт блок, 210 В)

в сравнительно узком температурном диапазоне, соответствующем этому значению z . При работе ТЭГ в широком интервале температур, что целесообразно с точки зрения увеличения КПД цикла Карно, используют различные материалы в наилучших для них температурных интервалах. Реализация этого подхода осуществляется сегментированием или каскадированием. При сегментировании ветви генератора, которые составлены из различных материалов, соединяют термически и электрически последовательно. При каскадировании ряд ступеней генератора располагают термически последовательно так, что теплота, отводимая от предыдущей ступени является теплотой, подводимой к последующей.

Подвод теплоты к горячим спаям ТЭГ и отвод ее от холодных спаев возможен различными способами в зависимости от типа источника энергии, назначения и условий эксплуатации ТЭГ. Весьма перспективным является использование для этих целей тепловых труб. Тепловые трубы имеют большую теплопередающую способность, малую плотность, не содержат агрессивных сред. В частности, для ТЭГ мощностью 100 кВт используются литий-молибденовые тепловые трубы диаметром 13–20 мм; количество тепловых труб лежит в пределах 90–140 [21].

Так как тепловые трубы могут быть изготовлены различной формы, то компоновка батареи ТЭГ легко может быть подчинена условиям компоновки энергетического модуля в целом. Это позволяет создавать батареи ТЭГ как в виде плоских панелей (рис. 5.6), так и кольцевого или сегментного типа (рис. 5.7). При этом ТЭГ имеет модульное исполнение (рис. 5.8).

Имеющиеся данные [16, 18] показывают, что в зависимости от температурного уровня КПД современных ТЭГ достигает 10–12 % и ожидается в районе 15–20 %. Удельная масса преобразователей лежит в пределах 1,7–5 кг/кВт.

Термомиссионные генераторы. Эффективность ТЭМГ оказывается достаточно высокой лишь при сравнительно больших значениях температур катода (термоэлектронного эмиттера) и анода. Так, уровень температур эмиттера в исследуемых ТЭМГ лежит в пределах 1800–2300 К

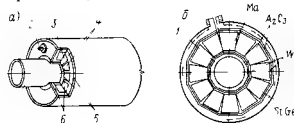


Рис. 5.7 Схема ТЭГ а — общий вид, б — вид сбоку

1 — высокотемпературная тепловая труба, 2 — выход
3 — термоэлектрические материалы, 4 — поддерживающее устройство, 5 — электроизоляция, 6 — теплоизоляция

и более при температуре анода примерно 800–1000 К, что существенно выше температур горячих спаев ТЭГ. Эффективность ТЭМГ также в значительной степени зависит от применяемых материалов состава и свойств межэлектродной среды.

В соответствии с существующей классификацией ТЭМГ могут быть вакуумными и газонаполненными. Вакуумные преобразователи имеют низкую температуру катода (1200–1400 К) и требуют обеспечения весьма малых зазоров между катодом и анодом (менее 10 мкм). Для вакуумных преобразователей характерны низкие удельная выходная мощность (порядка 1 Вт/см²) и КПД в районе 5 %. Эти показатели не дают оснований для ориентации на данный тип ТЭМГ в установках технических средств освоения океана.

В газонаполненных преобразователях компенсация пространственного заряда достигается путем введения положительных ионов в межэлектродное пространство, которые генерируются поверхностной или объемной ионизацией. Для этих целей используется цезий, который имеет самый низкий потенциал ионизации. Кроме того, цезий выгодно

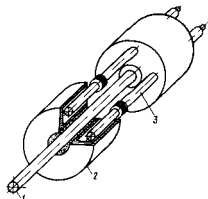


Рис. 5.8 Компоновка модулей ТЭГ

1 — высокотемпературная тепловая труба, 2 — ТЭГ, 3 — низкотемпературная тепловая труба

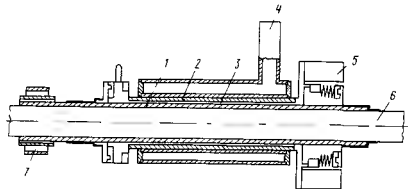


Рис. 5.9 Термомиссионный генератор

1 — эмиттер, 2 — коллектор, 3 — межэлектродный зазор, 4 — низкотемпературная тепловая труба, 5 — сьем коллектора, 6 — высокотемпературная тепловая труба, 7 — сьем эмиттера

Таблица 5 Характеристики термоэмиссионных генераторов

Число П, количество, переделываемая П, Вт	Элемент конструкции	Диаметр, мм при КПД			Элемент конструкции	Длина, мм, при 10 А/см ² и КПД			Длина, мм, при 15 А/см ² и КПД		
		0 15	0 20	0 25		0 15	0 20	0 25	0 15	0 20	0 25
80, 6250	ТТ	28,5	25,0	22,0	L	523,5	576,6	631,6	349,0	384,4	421,0
	Эм	38,0	34,5	31,5	n L	4 130	4 150	4 160	3 120	3 130	3 140
	П	54,5	51,0	48,0	П	680	760	800	480	510	540
114, 4390	ТТ	24,5	21,0	19,0	L	411,0	458,2	490,3	274,0	305,4	326,9
	Эм	34,0	30,5	28,5	n L	3 140	4 115	4 125	2 140	3 105	3 110
	П	50,5	47,0	45,0	П	540	620	660	360	435	450
154, 3250	ТТ	21,0	18,0	16,5	L	339,2	376,2	397,9	226,1	250,8	265,3
	Эм	30,5	27,5	26,0	n L	3 115	3 130	3 135	2 115	2 125	2 135
	П	47,0	44,0	42,5	П	465	510	525	310	330	350

Примечание ТТ тепловая труба, Эм - эмиттер П преобразователь
L - длина эмиттера, n - число термоэмиссионных элементов

отличается сравнительно низкой работой выхода В зависимости от давления паров цезия различают ТЭМГ низкого и высокого давления. Преобразователи низкого давления имеют удельную мощность 10 Вт/см² и КПД примерно 10 % при температурах катода 2200 К; расстояние между электродами до 1 мм (рис. 5.9). Преобразователи высокого давления имеют удельную мощность более 40 Вт/см² КПД в районе 20 % при температуре катода порядка 2200 К; расстояние между электродами составляет 100 мкм.

Приведенные данные дают основание ориентироваться в проектных проработках на достаточно высокие значения КПД ТЭМГ. Удельная масса таких преобразователей находится в районе 2 кг/кВт. В табл. 5.1 приведем некоторые характеристики ТЭМГ.

Таблица 5.2 Характеристика развития термоэмиссионных генераторов

Год	Барьерный индекс $\Phi_e + \Phi_d$, эВ	КПД, %, при температуре эмиттера, К	
		400	1700
1975	2,0	2	14,1
1976	1,9	9,0	16,5
1977	1,8	11,5	18,6
1978	1,7	14,0	21,3
1979	1,6	16,8	23,7
1980	1,5	20,0	26,4

Оценка эффективности термоэмиссионного генератора может быть выполнена с использованием рекомендаций работы [18].

Плотность тока находится по зависимости, $I_c = 120 T_c^{-2} \exp[-\Phi_c/(kT_c)]$ А/см², где T_c температура коллектора, К, Φ_c работа выхода коллектора, эВ, $k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ постоянная Больцмана, эВ/К, 120 - эмиссионная постоянная, А/(см² · К²).

Эффективная барьерная высота $\Psi = kT_E \ln[120 T_E^2 / (I + I_c)(1 + 3/4 d/\lambda)]$ эВ, где T_E температура эмиттера, К; I плотность тока, А/см²; d - межэлектродное расстояние, мм; λ длина свободного пробега электронов.

Выходное напряжение $V_0 = \Psi - \Phi_c - V_d - I \mathcal{R}$ В где V_d падение на напряжения в дуге, V_d^2 - падение напряжения учитывающее продольное движение ионов

Удельная тепловая мощность, подводимая к преобразователю, $P_t = 1,6 \cdot 10^3 T_E + 1,1 \cdot 10^{12} (T_E^2 - T_c^2)$, Вт/см², КПД преобразователя $\eta = (V_0 - I \Delta V_{0L}) / (P_t - 0,5 I \Delta V_{0L} + \Delta Q_{0L})$, где ΔV_{0L} - падение напряжения на зажимах, В; ΔQ_{0L} - джоулева теплота, Вт/см²

В табл. 5.2 показана характеристика развития ТЭМГ, которая свидетельствует о существенном повышении их эффективности в последние годы.

5.4 Эффективность энергетических модулей

Основным критерием оценки эффективности ЭМ с ТЭМГ и ТЭГ и тепловыми графитовыми аккумуляторами, как и в случае машинных преобразователей, будем считать удельную массу энергетического модуля m

При определении массы энергетического оборудования величину массы ГЭО определяем по выражению $M_{ТЭО} = M_{ТЭМГ} + M_{ТЭГ} + M_{ТЛ} + M_{пр}$, где $M_{ТЭМГ}$, $M_{ТЭГ}$ - массы термоэмиссионного и термоэлектрического генераторов $M_{ТЛ}$ - масса тепловых труб, $M_{пр}$ - масса прочего оборудования (баллон, блок управления и др.)

Масса источника энергии (ТА) вычисляется аналогично по приведенным ранее зависимостям с учетом прочного корпуса ТА. При этом масса ТАМ (графита) находится по выражению

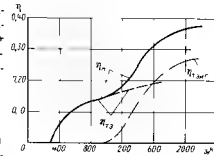


Рис. 5.4. Зависимости КПД ТЭМГ и ТЭГ от температуры эмиттера перед преобразованием

$$M_{\text{ТАМ}} = \frac{3600 N_{\text{ПГ}} (1 + \bar{N}_{\text{СН}})}{\left[\eta_{\text{П}} (H_{\text{Н}} - H_{\text{З}}) + \int \eta_{\text{П}} (H_{\text{З}} - H_{\text{К}}) dT \right] (1 - \xi_{\text{ОС}})}$$

Величины $H_{\text{Н}}$, $H_{\text{З}}$ и $H_{\text{К}}$ представляют собой энтальпии графита при температурах нагрева графитовой матрицы $T_{\text{Н}}$, температуре перед термоэмиссионным генератором $T_{\text{З}}$ и температуре холодного слая ТЭГ; $\eta_{\text{П}}$ - КПД комбинированной установки, использующей на верхнем температурном уровне ТЭМГ, а на нижнем температурном уровне ТЭГ. КПД такого преобразователя определяется по выражению $\eta_{\text{П}} = \eta_{\text{ТЭМГ}} + \eta_{\text{ТЭГ}}$.

На рис. 5.10 приведены зависимости, построенные с учетом рекомендаций работ [18, 21, 29, 33], которые позволяют оценить КПД термоэмиссионного термоэлектрического генераторов, а также комбинированного преобразователя.

Масса энергетического модуля (рис. 5.11) $M = M_{\text{Э.О.}} + M_{\text{ПК}} - M_{\text{Н.З.}} + M_{\text{ТЭО}} + M_{\text{ПК}}$. Удельная масса энергетического модуля $m = M / (N_{\text{ПГ}} \tau)$.

Оценка массогабаритных показателей ЭМ выполнена для диапазона на мощности 30–150 кВт при автономности 15–100 ч. Температура катода ТЭМГ принималась равной 1600–2000 К температура анода 900 К. Нижний уровень температуры ТЭМГ температура холодного слая - 300 К.

Анализ показал что удельная масса ЭМ в рассматриваемом диапазоне параметров лежит в пределах 3,1–6,6 кг/(кВт·ч). Это свидетельствует о том, что применение безмашинного преобразователя может быть вполне оправдано с учетом дальнейшего совершенствования преобразователей и оптимизации параметров ЭМ удельная масса может быть еще уменьшена

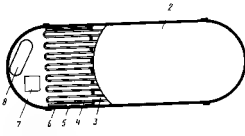


Рис 5.11 Энергетический модуль с тепловым графитовым аккумулятором и термогенератором

1 - прочный корпус 2 - тепловой аккумулятор, 3 - высокотемпературная тепловая труба 4 - термогенератор, 5 - низкотемпературная тепловая труба, 6 - теплоизоляционная труба, 7 - датчик управления, 8 - баллон

6 СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК РАЗЛИЧНОГО ТИПА

6.1 Исходные положения

В настоящее время разработаны и продолжают разрабатываться различные типы автономных источников электрической энергии (АБ, установки с машинным преобразованием энергии, электрохимические генераторы, ТЭГ, ТЭМГ и др.) [1, 2, 4–7, 9]. Применение того или иного типа источника электрической энергии зависит от многих факторов и в первую очередь от назначения, автономности мощности.

Определенное место занимают турбинные установки с ДС, которые могут использовать различные виды энергии: ядерную, химическую и тепловую. Для источников электрической энергии мощностью 20–150 кВт при автономности 10–100 ч и более возможно применение этих установок, использующих химическую и тепловую энергию [1, 2, 5, 6, 9, 13, 23, 27, 35].

Эффективность автономного источника электрической энергии определяется эффективностью используемого источника энергии, совершенством преобразователя энергии, условиями эксплуатации (мощностью, автономностью и др.).

Выбор типа установки включает следующие этапы.

- анализ эффективности различных источников энергии и отбор альтернативных для дальнейших проработок;
- выбор термодинамического цикла преобразователя энергии оп-
ределение состава тепловой схемы установки и оборудования
- определение удельных показателей анализируемых установок
- всесторонний технико-экономический анализ
- принятие решения

Различные условия работы установок приводят к необходимости принятия в качестве основных критериев эффективности удельной энергоёмкости E , кВт·ч/кг, или удельной массы m , кг/(кВт·ч).

Вопрос о выборе типа установки должен быть решен на базе всестороннего анализа ряда показателей при условии удовлетворения предъявляемых требований. Ниже дано сравнение эффективности автономных источников энергии с турбинными преобразователями, использующими химическую и тепловую энергию а также с газотурбинным преобразователем и ДС с тепловым аккумуляторами. Такой подход

позволяет дать более полную характеристику различным автономным теплоэнергетическим установкам, сделать более обоснованный выбор их типа

6.2 Эффективность источников энергии

В качестве источника химической энергии применяются различные топлива, состоящие из нескольких компонентов горючего и окислителя. Имеются примеры однокомпонентных топлив, а также унитарных. Ниже рассматриваются следующие топлива (горючие и окислители) - керосин, перекись водорода, водород - кислород; алюминий - вода.

Использование керосина и перекиси водорода с одной стороны, предпочтительно ввиду возможного их хранения в эластичных емкостях, с другой - приводит к необходимости удаления образующегося углекислого газа. Большие затраты мощности на выброс, а также трудности, связанные с длительным хранением перекиси водорода и применением в судовых условиях, не дают оснований для широкого применения этого топлива.

В табл. 6.1 приведены характеристики топлив водород-кислород и алюминий-вода при стехиометрическом соотношении горючего и окислителя. В ее основе лежат следующие реакции: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ 120 100 кДж/кг (на 1 кг водорода); $2Al + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2$ - 15 070 кДж/кг (на 1 кг алюминия). Образующийся в результате реакции алюминия с водой водород приходится дожигать (затраты на выброс весьма велики), что приводит к необходимости иметь определенный запас кислорода. В этом случае $2Al + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2$ - 15 070 кДж/кг (на 1 кг алюминия); $3H_2 + 1,5O_2 \rightarrow 3H_2O$ - 120 100 кДж/кг (на 1 кг водорода). Суммарное количество теплоты, выделившееся при данных

реакциях, составит 13 355 кДж/кг на 1 кг алюминия. В записанных реакциях количество выделившейся теплоты отнесено к 1 кг горючего. Количество теплоты, выделившейся при сгорании 1 кг топлива (горючего и окислителя), находится с использованием стехиометрического соотношения горючего и окислителя.

Для гидрореагирующего горючего (ГРГ) количество выделившейся теплоты принято относить к 1 кг горючего, что связано с использованием в качестве окислителя заборной воды, которую не нужно транспортировать, а в случае дожигания водорода - воды, получающейся в результате реакции.

В качестве источника тепловой энергии рассматривается тепловой графитовый аккумулятор. Оценка эффективности ТА дана в гл. 2. Более полную оценку эффективности применяемых источников энергии можно сделать, учитывая условия эксплуатации.

В табл. 6.2 приведены значения удельной энергоемкости рассматриваемых источников энергии. Энергоемкость источника энергии отнесена к суммарной массе топлива (или ТА) + массе контейнера, в котором оно хранится, и массе ПК.

Объем контейнера для размещения жидких водорода и кислорода равен 1,16 объема содержимого, а удельная масса 90 и 120 кг/м³ соответственно. Удельная масса контейнера для хранения алюминия составляет 100 кг/м³. Принято, что ТА имеет сферичесилиндрический прочный корпус; остальные прочные корпуса - сферические. Материал прочного корпуса - сталь, титановый и алюминиевый сплавы.

При оценке массовых показателей установок в качестве исходного принят вариант 1 с относительной массой корпуса, равной единице; для варианта 2 она равна 2,58. При использовании ТА для варианта 2 относительные массы корпуса составляют 4,3 2,66 4,6.

Таблица 6.1 Энергетические показатели топлив при стехиометрическом соотношении компонентов

Топливо		Удельная теплота сгорания горючего МДж/кг	Стехиометрическое соотношение	Удельная теплота реакции топлива, МДж/кг	Удельная энергоемкость топлива кВт/кг
Горючее	Окислитель				
Водород	Кислород	120,1	7,936	13,44	3,733
Алюминий	Вода	15,07	1,0015	15,07*	4,186*
Алюминий	Вода, кислород для дожига алюминия	28,43	0,8825	15,10**	4,194**

* На 1 кг алюминия

** На 1 кг алюминия и стехиометрического количества кислорода для дожига алюминия

Таблица 6.2 Удельная энергоемкость кВт/кг источников энергии с учетом массы контейнера для их хранения при различных материалах прочного корпуса

Источник энергии	Сталь	Титановый сплав		Алюминиевый сплав		
		Вариант				
		2	2	1	2	
Водород (ж) * кг	1 7 6	1 044	922	1 256	2 074	1 433
Кислород (ж) *	3 227	2 346	3 377	2 782	3 476	2 909
Алюминий вода						
Кислород (ж) *						
Графитовый ТА	1 305	1 057	1 333	1 230	1 336	1 135

*(ж) - жидкий

Анализ приведенных данных показывает, что при хранении источников энергии в ПК их удельная энергоемкость существенно уменьшается с увеличением массы прочного корпуса. Применение титановых и алюминиевых сплавов для изготовления ПК несколько улучшает показателя удельной энергоемкости источников энергии по сравнению со стальными. Вопрос о применении конкретного источника энергии должен решаться с учетом эффективности преобразователя энергии назначения, условий эксплуатации и других требований.

6.3. Сравнение эффективности турбинных установок различного типа

Основные зависимости. При оценке эффективности турбинных установок в качестве конкурентоспособных рассматриваются ПТУ и ГТУ, для которых в качестве топлива используются соответственно водород, кислород, или алюминий-вода-кислород (последний для дожигания образующегося водорода) и водород-кислород, конкурентоспособен также ГТУ с тепловым графитовым аккумулятором. Принято, что ТЭО и источник энергии находятся в прочных корпусах.

Масса установки $M_y = M_{э.о} + M_{и.э}$, где $M_{э.о}$, $M_{и.э}$ — массы энергетического оборудования и источника энергии, кг.

Масса источника химической энергии $M_{и.э} = M_i + M_{к.г} + M_o + M_{к.о}$, где M_i , M_o — массы запасов горючего и окислителя, кг; $M_{к.г}$, $M_{к.о}$ — масса контейнеров, в которых содержатся в криогенном состоянии запасы горючего и окислителя, кг.

Масса запасов топлива, горючего и окислителя, $M_T = N_e \tau / (\eta_e E_T)$, $M_o = M_i L_o$, кг, где $N_e \tau$ — энергоемкость, кВт·ч; η_e — эффективный КПД установки; E_T — теоретическая удельная энергоемкость топлива, кВт·ч/кг; L_o — безразмерная величина, учитывающая соотношение горючего и окислителя.

При использовании в качестве горючего алюминия учитывается лишь масса кислорода для дожигания образующегося водорода. Масса ПК при использовании химического источника энергии $M_{ПК} = M_{ПК}^{ТЭО} + M_{ПК}^{и.э} + M_{ПК}^{к.г}$, где $M_{ПК}^{ТЭО}$, $M_{ПК}^{и.э}$, $M_{ПК}^{к.г}$ — массы прочных корпусов для размещения теплоэнергетического оборудования, контейнеров с горючим и окислителем, кг. Масса источника тепловой энергии (теплового аккумулятора) $M_{и.э} = M_{ТА}$. При использовании источника тепловой энергии (ТА) масса прочного корпуса определяется в соответствии с рекомендациями гл. 4. Удельные массы установок без прочного корпуса и с прочным корпусом, кг/(кВт·ч), $m_s = M_y / (N_e \tau)$, $m = M / (N_e \tau)$.

ГТУ с ТА размещается в сфероцилиндрическом ПК для остальных типов установок ПК сферическое. В качестве материала ПК рассматриваются сталь, титановые и алюминиевые сплавы.

Оценка эффективности рассматриваемых типов установок выполнена для энергоемкости 200 и 2000 кВт·ч (эффективная мощность турбоприводов 20 и 100 кВт автономность 10 и 20 ч).

Эффективный КПД паротурбинной установки (ПТУ) лежит в пределах 0,16–0,2 при $N_e = 20 \div 100$ кВт (начальные параметры пара p_3 5 МПа, T_3 873 К, $p_4 = 0,01$ МПа, КПД турбин 0,4 и 0,5 для нижнего и верхнего значений мощности).

Эффективный КПД газотурбинной установки $\eta_e = 0,4$ достигается при следующих условиях: рабочее вещество замкнутого газотурбинного контура — гелий-кислородная смесь; температура перед компрессором $T_1 = 300$ К; температура перед турбиной $T_3 = 1150$ К; степень регенерации $r = 0,96$; КПД компрессора $\eta_k^* = 0,82$, турбины $\eta_t^* = 0,88$; степень повышения давления в компрессоре $\pi_k = 1,9$.

На рис. 6.1 представлены зависимости относительной удельной массы ЭУ различного типа от величины N для стального ПК. Относительная удельная масса m представляет собой отношение удельной массы установки к удельной массе установки с тепловым графитовым аккумулятором.

Полученные данные позволяют провести сравнительную оценку эффективности рассмотренных установок и сделать некоторые выводы о наиболее приемлемом типе установки. На величину удельной массы установки существенное влияние оказывает энергоемкость, масса и материал корпуса. В то же время качественная картина их влияния на показатели установок практически остается неизменной при различных материалах ПК.

Однако с увеличением массы ПК степень ее влияния на удельную массу оказывается различной в зависимости от типа установки. Вследствие существенного влияния массы ПК на удельную массу ПТУ, работающей на топливе водород-кислород, применение ее при больших массах ПК не является оправданным. При малых значениях энергоемкости, а также при больших значениях энергоемкости и малой массе ПК достаточно малой удельной массой обладают ГТУ.

При больших энергоемкости и массе ПК паротурбинная установка, работающая на топливе алюминий-вода-кислород, обладает минимальной удельной массой по сравнению с другими рассматриваемыми типами

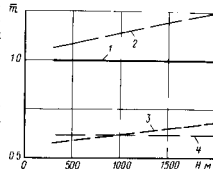


Рис. 6.1 Зависимости относительной удельной массы энергетических установок

1 ГТУ с ТА, 2 ПТУ (H_2 , O_2), 3 ГТУ ($H_2 + O_2$), 4 ПТУ ($Al + H_2O + O_2$)

установок. Это связано с менее значительным ростом массы ее ПК при увеличении энергоемкости. Вместе с тем значения удельной массы ГТУ и ПТУ с ГРГ весьма близки по абсолютной величине. Это приводит к необходимости учета дополнительных показателей, и в первую очередь эксплуатационных, с целью более объективного выбора типа установки.

Паротурбинная установка с ГРГ. Несмотря на значительные энергоемкость и массу ПК эта установка имеет удельную массу меньшую чем газотурбинные с ТА и с топливом водород—кислород.

При создании ПТУ с ГРГ (алюминий—вода—кислород) требуется решить ряд проблем связанных с использованием металлических горючих:

- подготовка и позирование подачи металлического горючего в камеру сгорания;
- обеспечение стабильности эффективной химической реакции и расчетных параметров пара;
- создание камер сгорания алюминия с достаточно большим ресурсом;
- сепарация продуктов реакции перед поступлением их в турбину;
- обеспечение удаления твердых продуктов реакции (около 2 кг двуокиси алюминия на 1 кг алюминия).

Указанные особенности, а также отсутствие надежных опытно-промышленных образцов делают проблематичным использование ПТУ на топливе алюминий—вода—кислород в качестве источника электрической энергии.

Газотурбинная установка с топливом водород—кислород. При малых энергоемкостях и массе ПК она имеет значение удельной массы практически такое же, как и у ПТУ с ГРГ. Сжигание водорода в кислороде принципиально проще сжигания алюминия в воде.

Основные проблемы при создании данного типа установки связаны со спецификой применения криогенных топлив:

— необходимостью хранения в судовых условиях значительных количества жидкого водорода и кислорода в течение длительного времени;

— весьма сложной обработкой топливных баков перед заправкой, значительными потерями водорода в процессе заправки и при хранении, которые создают опасность пожара и взрыва, а также затрудняют постоянную готовность установки к действию;

— необходимостью строгого соблюдения минимальных расстояний между емкостями с жидким водородом и источником возможного воспламенения, что затрудняет размещение емкостей на судне.

Трудности, связанные с эксплуатацией установок, работающих на криогенном топливе, являются сдерживающим фактором их внедрения.

Газотурбинная установка с тепловым графитовым аккумулятором. Ее удельная масса близка к таковой для ГТУ с криогенным топливом.

Основным преимуществом ГТУ с ТА является полное отсутствие процессов горения и топливной системы — одного из наименее надежных элементов; минимальное количество элементов установки повышает ее надежность по сравнению с установками на топливе водород—кислород; отсутствие влияния установки в процессе работы на изменение плавуности; простота и безопасность зарядки ТА и поддержание высокой готовности установки; установка с ТА является экологически чистой теплоэнергетической установкой.

Создание ГТУ с ТА в то же время связано с обеспечением достаточной высокой температуры матрицы ТА, использованием специальных типов теплоизоляции, применением специализированного оборудования для нагрева матрицы ТА, необходимостью применять специальную систему поддержания постоянной температуры газа перед турбиной.

Приведенный материал позволяет считать, что ГТУ с тепловым графитовым аккумулятором для энергоемкости 200—2000 кВт·ч и более имеет ряд принципиальных преимуществ перед другими типами установок.

6.4. Сравнение эффективности энергетических установок различного типа с тепловыми аккумуляторами

Практически интерес для технических средств освоения океана представляют установки с тепловым графитовым аккумулятором и различными преобразователями тепловой энергии (ГТУ закрытого цикла, ДС генераторы прямого преобразования) [6, 7].

Применение модульного принципа при разработке энергетических комплексов позволяет при сравнении эффективности различных типов установок на первом этапе использовать в качестве основного критерия удельную массу ЭМ m , кг/(кВт·ч). При этом сравнение следует проводить при оптимальных для каждой установки параметрах. Выполненное определение оптимальных параметров рассматриваемых типов установок в гл. 4 и 5 позволяет достаточно корректно дать оценку их сравнительной эффективности по величине удельной массы.

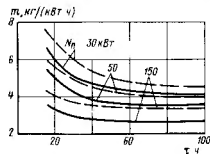


Рис. 6.2. Сравнение удельной массы энергетических модулей различного типа с тепловым графитовым аккумулятором

— на базе газотурбогенератора; — на базе стирлин-генератора; $\eta_{ГД} = 10\%$

На рис. 6.2 показано сопоставление эффективности ЭМ автономных источников электрической энергии на базе ГТГ и стирлинг-генератора. Как видно, удельная масса энергетического модуля на базе газотурбогенератора несколько (примерно на 10–15 %) ниже, чем модуля на базе стирлинг-генератора, в зависимости от мощности модуля и автономно сти. Такая величина в различии удельной массы модулей не может быть решающей при выборе типа установки.

В этом случае следует рассматривать и другие факторы. Так если ЭУ предназначена для выработки электрической энергии, то наиболее приспособленной является газотурбинная. Высокая частота вращения турбокомпрессора хорошо согласуется с требуемой частотой вращения высокочастотного электрогенератора. Это позволяет создавать конструкцию турбокомпрессора-генератора в виде единого блока с общим ротором (см. гл. 3).

В случае привода непосредственно винта удобной может оказаться установка с ДС. ЭУ при этом упрощается, так как будут отсутствовать электрогенератор и мультипликатор. Следует заметить что такой вариант установки с ДС более предпочтителен по сравнению со стирлинг генератором.

Применение генераторов прямого преобразования тепловой энергии в сочетании с тепловым графитовым аккумулятором и тепловыми трубами позволяет создать ЭМ достаточно простой и надежный, имеющий при высоких значениях КПД преобразователя удельную массу в несколько раз меньшую, чем у традиционно применяемых электроаккумуляторных батарей.

Конечно, развитие науки и техники совершенствование технологии будут способствовать совершенствованию и развитию установок различных типов. Уже сейчас требуется проведение значительных опытно-конструкторских работ для создания демонстрационных и опытно-промышленных образцов ЭМ, накопление опыта их эксплуатации.

6.5. Сравнение эффективности энергетических установок с тепловыми аккумуляторами и электроаккумуляторами

К числу бестопливных ЭУ относится большой класс ЭУ, использующих электрохимические источники энергии — различные АБ. Подавляющее большинство созданных в мире подводных аппаратов имеют ЭУ с АБ [4, 9]. Поэтому представляет интерес сопоставление эффективности ЭУ с ТА и с АБ.

Наиболее широкое применение нашли свинцово-кислотные АБ имеющие удельную массу 30–36 кг/(кВт·ч) при числе рабочих циклов до 2000. За счет совершенствования конструкции ожидается снижение удельной массы этих АБ до 16–18 кг/(кВт·ч). Достижение удельной

Рис. 6.3. Сравнение удельной массы энергетических установок с различными АБ и ТА ($N = 30$ кВт, без прочного корпуса)

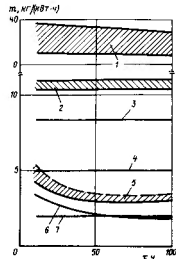
1 — свинцово-кислотные АБ; 2 — никель-цинковые АБ; 3 — серебряно-цинковые АБ; 4 — литий-металл-сульфидные АБ; 5 — ЭУ с тепловым графитовым аккумулятором; 6 — литий-водные батареи; 7 — литий-хлоридные батареи

массы 8–9 кг/(кВт·ч) возможно в серебряно-цинковых АБ, имеющих одного малый срок службы (10–20 циклов) и в 8–18 раз выше стоимости, чем стоимость свинцово-кислотных АБ.

Никель-цинковые АБ занимают промежуточное положение по удельной массе [10–14 кг/(кВт·ч)], сроку службы (300 циклов) и стоимости, которая близка к стоимости свинцово-кислотных АБ. Дальнейшее снижение удельной массы АБ до значений 5 кг/(кВт·ч) связано с применением литий-металл-сульфидных АБ работающих при температуре 670–720 К с расплавленным соевым электролитом. Срок службы и стоимость этих батарей близки к таковым для свинцово-кислотных АБ. Перспективные электрохимические элементы одноразового использования имеют удельную массу 2–3,5 кг/(кВт·ч) [25].

На рис. 6.3 представлены зависимости удельной массы ЭУ с АБ и с тепловым графитовым аккумулятором. Как видно ЭУ, на базе газотурбинного преобразователя и ДС имеют удельную массу в 8–10 раз меньше, чем со свинцово-кислотными АБ и в 2–3 раза меньше, чем с серебряно-цинковыми АБ.

Применение усовершенствованных электроаккумуляторных батарей связано с использованием редких и дорогостоящих веществ (лития и серебра) что серьезно сдерживает их широкое внедрение.



Одним из направлений в решении задач, связанных с экономией топлива, созданием бестопливных энергетических установок, охраной окружающей среды является аккумулярование тепловой энергии. Установки с тепловыми аккумуляторами находят применение в различных областях техники: наземный, воздушный и морской транспорт, технологические процессы электростанций, техника высоких температур и ряде других.

Для технических средств освоения океана интерес представляют энергетические установки с тепловыми графитовыми аккумуляторами. Отсутствие процессов сжигания топлива, сравнительная простота конструкции, возможность модульного исполнения делают их привлекательными для использования в качестве автономных источников электрической энергии. Преобразователями тепловой энергии графитовых аккумуляторов могут быть газотурбинные двигатели, двигатели Стирлинга, термоэмиссионные и термоэлектрические генераторы. Естественно, что весьма заманчивым является разработка энергетических установок с прямым преобразованием тепловой энергии графитовых аккумуляторов в электрическую.

Модульное исполнение автономных источников энергии позволяет разрабатывать их в виде мощностного ряда и использовать для различных технических средств.

Удельная масса энергетических модулей на базе рассмотренных преобразователей с тепловыми графитовыми аккумуляторами оценивается величиной 3–7 кг/(кВт·ч) в зависимости от энергоемкости, что существенно ниже, чем у традиционных электроаккумуляторных батарей. Решение вопроса о выборе типа установки будет во многом зависеть от степени их опытно-промышленного освоения.

Созданием этой книги автор стремился привлечь внимание исследователей, инженеров, конструкторов, молодых специалистов, студентов технических вузов к решению проблем использования нетрадиционных источников энергии в технике освоения океана.

1. Алексеев Г. Н. Основы теории энергетических установок подводных подвижных аппаратов. — М.: Наука, 1974.
2. Грейнер Л. Гидродинамика и энергетика подводных аппаратов/Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978.
3. Грилихес В. А., Матвеев В. М., Полуэктов В. П. Солнечные высокотемпературные источники тепла для космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1975.
4. Дмитриев А. Н. Проектирование подводных аппаратов. — Л.: Судостроение, 1978.
5. Курзон А. Г., Страутман И. Ф., Уваров А. Б. Исследование одноконтурных паротурбинных и парогазотурбинных установок в качестве двигателей подводных аппаратов // Труды ЛКИ. „Исследование теплоэнергетических установок для подводных аппаратов“. — Л., 1978. С. 3–14.
6. Левенберг В. Д. Судовые турбоприводы. Справочник. Л.: Судостроение, 1983.
7. Левенберг В. Д., Ткач М. Р. Определение эффективности стирлинг-генератора с тепловым графитовым аккумулятором // Судовое энергомашиностроение. Николаев, 1983. С. 16–27.
8. Регенеративный электронагреватель газа для ГДЛ / Горичев С. Б., Макеев В. С., Орлов М. Ю. и др. // Инженерно-технический журнал. Т. 35. 1983. № 3. С. 359–365.
9. Системы и элементы глубоководной техники подводных исследований // Под ред. В. Л. Ястребова — Л.: Судостроение, 1981.
10. Allesu T., Brichard A., Chabanne J., De Lalle J. The combined molten salt thermal storage and sodium heat pipes for the ECA stirling engine // Proc. 18th Intersoc Energy Convers. Eng. Conf. 1983. Vol. 2. 796–801.
11. Asselman G. A. A., Spigt C. L., Meijer R. J. Design Consideration on a Thermal Energy Storage Stirling Engine Automobile // Society of Automotive Engineering Preprint. 1977. N 770080.
12. Balykjian H., Rackley R. A closed Brayton cycle power system for deep submergence vehicles // AIAA Paper. 1970. N 70–519. P. 1–9.
13. Barutis E. F. Storing thermal energy // Astronautics and aerospace engineering. 1963. N. 4. P. 29–30.
14. Beckmann G., Gilli P. V. Thermal Energy Storage. Springer Verlag, Wien, 1983.
15. Beverly W. D., Engle W. W., Mahony F. O. Integration of High Temperature Thermal Energy Storage into a Solar Thermal Brayton Cycle Power Plant // Proc. 12th Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf. 1977. Vol. 1. P. 1195–1202.
16. Buden D. 100-kWe Nuclear space electric power source // AIAA Paper 1979 N 79–2089.
17. Cabannes F. Les isolants thermiques modernes // Revue generale de therm qu s 980. Vol. 19 N 219. P. 183–192.

18. Collector temperature effects on the performance of advanced thermionic converters and nuclear electric propulsion systems / Dick R. S., McVey J., Britt E. J., Fitzpatrick G. O. // Proc. 15th Intersoc. Energy Conver. Eng. Conf. 1980. P. 1766–1772.
19. Devries G., Karigt H. E., Drage G. Eutectic Molten Salt Thermal Storage System // *Hydronautics*. 1969. Vol. 3. N4. P. 191–195.
20. Duvall G. D. Operation Evaluation of a Closed Brayton Cycle Laboratory Engine // Proc. 11th Intersoc. Energy Conver. Eng. Conf. 1976. Vol. 1. P. 171–176.
21. Ewell R. Nuclear thermoelectric space power // – Proc. 4th Int. Conf. Thermoelec. Energy Convers. 1982. P. 29–34.
22. Fayrweather D. I., Raclely R. A., Robbins F. A. Advanced marine closed Brayton engines // Proc. 11th Intersoc. Energy Conver. Eng. Conf. 1976. P. 177–183.
23. Harper A. D., Spragins W. W. Development of a thermal storage heater for a closed Brayton cycle engine // Proc. 12th Intersoc. Energy Conver. Eng. Conf. 1977. Vol. 1. P. 208–215.
24. Kettler Jack R. The Thermal vehicle a pollution free concept // Record 10th Intersoc. Energy Conver. Eng. Conf. 1975. P. 548–554.
25. Lund T. J., Mc Cartney J. F. Survey of Power Systems for Small Undersea Vehicles // SAE Techn. Pap. Ser. 1978. N 780703.
26. March F. A. Portable heat storage unit // U S Patent N 3 569669 Int kl B63c 11/28, 1971.
27. Michels A. P. J. The Philips Stirling Engine: A Study of its Efficiency as a Function of Operating Temperatures and Working Fluids // Proc. 11th Intersoc. Energy Conver. Eng. Conf. 1976. Vol. 2. P. 1506–1510.
28. Mock E. A., Balykjian H. Undersea Application of a closed Brayton cycle power plant // SAE Propr. 1971.
29. Mondt J. F., Stapfer G., Hsieh T. Nuclear power source for electric propulsion // AIAA Paper. 1979. N 79–2088.
30. Muench R. K., Duvall G. D. Operation of a 30 kW Brayton Cycle With a thermal energy storage heat source // AIAA Paper. 1981. N 81–1529.
31. Nikolaus M. Warmespeicher für Triebwerke // Offenlegungsschrift BRD N 262676 1976.
32. Phillips T. W. The closed cycle gas turbine as an undersea power source // AIAA Paper. 1969. N 69–384. P. 1–11.
33. Phillips W. M., Estabrook W. C., Hsieh T. M. Nuclear thermionic power system for spacecraft // Proc. 11th Intersoc. Energy Conver. Eng. Conf. 1977. P. 1487–1493.
34. Saban Balkan. Warmespeicherantriebe für die schadstofffreien Fahrzeugbetrieb VDI-Z. 117. 1975. N 9. S. 422–429.
35. Walker G. Stirling engines. Clarendon Press Oxford 1980.

АБ	аккумуляторная батарея
ГРГ	гидрореагирующее горючее
ГТГ	газотурбогенератор
ГТД	газотурбинный двигатель
ГТУ	газотурбинная установка
ДС	двигатель Стирлинга
ПК	прочный корпус
ПМ	паровая машина
ПТД	паротурбинный двигатель
ПТУ	паротурбинная установка
ТА	тепловой аккумулятор
ТАМ	теплоаккумулирующий материал
ТЭГ	термоэлектрический генератор
ГЭМГ	термоэмиссионный генератор
ТЭО	теплоэнергетическое оборудование
ЭМ	энергетический модуль
ЭУ	энергетическая установка